



HAL
open science

Acquisition de la forme des axes ligneux d'un an chez trois variétés d'abricotier : confrontation de données expérimentales à un modèle biomécanique

Tancrede Almeras

► To cite this version:

Tancrede Almeras. Acquisition de la forme des axes ligneux d'un an chez trois variétés d'abricotier : confrontation de données expérimentales à un modèle biomécanique. Sciences du Vivant [q-bio]. École nationale supérieure agronomique de Montpellier, 2001. Français. NNT: . tel-04495443

HAL Id: tel-04495443

<https://hal.inrae.fr/tel-04495443>

Submitted on 8 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

THESE

Pour obtenir le grade de DOCTEUR

Discipline: Biologie, Diversité et Adaptation des Plantes Cultivées

Présentée et soutenue publiquement par

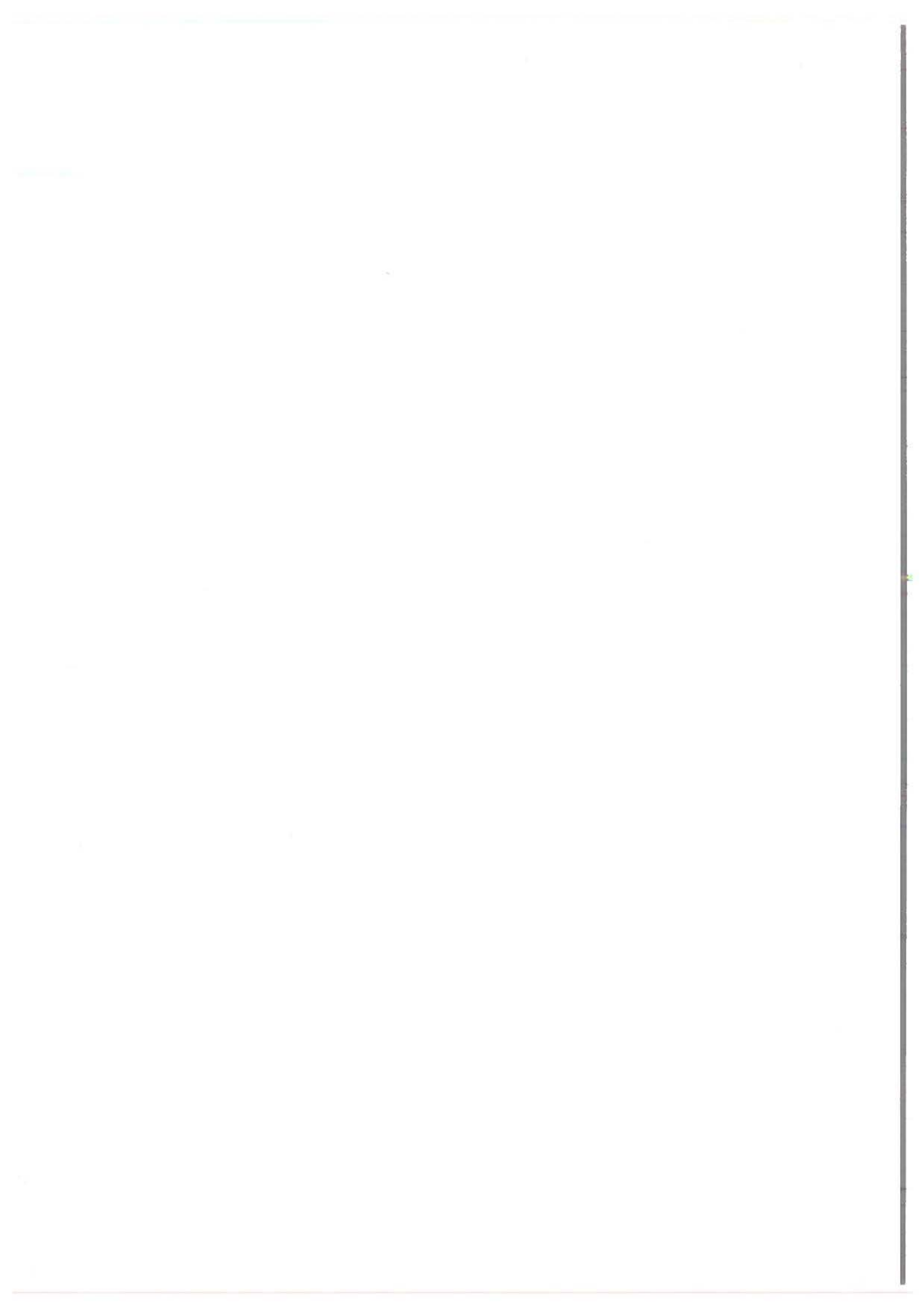
Tancrède ALMERAS

Le 25 avril 2001

Acquisition de la forme des axes ligneux d'un an
chez trois variétés d'abricotier :
confrontation de données expérimentales
à un modèle biomécanique.

JURY

Françoise DOSBA	Professeur à l'AGRO-Montpellier	Président du Jury
Georges JERONIMIDIS	Professeur à l'Université de Reading (UK)	Rapporteur
Jean-Claude MAUGET	Professeur à l'INH Angers	Rapporteur
Bernard THIBAUT	Directeur de Recherche CNRS	
François HOULLIER	Directeur de Recherche INRA	
Evelyne COSTES	Chargé de Recherche INRA	



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER

THESE

Pour obtenir le grade de DOCTEUR

Discipline: Biologie, Diversité et Adaptation des Plantes Cultivées

Présentée et soutenue publiquement par

Tanocrède ALMERAS

Le 25 avril 2001

Acquisition de la forme des axes ligneux d'un an
chez trois variétés d'abricotier :
confrontation de données expérimentales
à un modèle biomécanique.

JURY

Françoise DOSBA	Professeur à l'AGRO-Montpellier	Président du Jury
Georges JERONIMIDIS	Professeur à l'Université de Reading (UK)	Rapporteur
Jean-Claude MAUGET	Professeur à l'INH Angers	Rapporteur
Bernard THIBAUT	Directeur de Recherche CNRS	
François HOULLIER	Directeur de Recherche INRA	
Evelyne COSTES	Chargé de Recherche INRA	

Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement d'un parcours de plus de trois ans. Arrivé à la fin de sa rédaction, j'ai le plaisir de pouvoir remercier les personnes sans lesquelles je ne serais pas arrivé au bout, ceux et celles qui m'ont accompagné pendant un temps, montré la route ou indiqué des raccourcis, encouragé et parfois remis en selle.

Je voudrais tout d'abord remercier la direction de l'INRA, pour avoir apporté son soutien financier à cette thèse.

Je remercie le Pr. Françoise DOSBA, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et avoir accepté de diriger cette thèse. Je la remercie tout particulièrement pour ses encouragements, son soutien dans les aspects administratifs et pour les moyens, matériels et humains, qu'elle n'a pas d'hésité à mettre à ma disposition.

J'exprime toute ma gratitude à mes rapporteurs, pour avoir consacré une part de leur temps précieux à l'examen d'un mémoire remis avec un peu de retard. Merci donc au Pr. Jean-Claude MAUGET qui a accepté de rapporter pour cette thèse dont certains aspects sont éloignés de ses préoccupations habituelles. Merci au Pr. Georges JERONOMIDIS de nous faire l'honneur de sa présence en France, et d'avoir accepté de rapporter une thèse qui n'est pas écrite dans sa langue maternelle.

Tous mes remerciements au Pr. Bernard THIBAUT pour avoir accepté de faire partie de mon comité de thèse, puis de mon Jury. Merci aussi pour m'avoir accueilli au LMGC et pour avoir accepté ma présence au sein de son équipe lors de ce colloque à Freiburg que je n'oublierai pas.

Merci à François HOULLIER pour sa participation à mon comité de thèse. Merci pour avoir continué à témoigner sa confiance en acceptant de faire partie de mon Jury, alors que ce travail s'est quelque peu écarté de sa forte composante « AMAP » initiale.

Toute ma reconnaissance va à Evelyne COSTES, qui est certainement la personne à qui je dois le plus dans cette thèse. Elle m'a accordé sa confiance dès le début, et m'a accompagné tout au long de mon parcours. Merci pour sa présence d'esprit et sa force de caractère qui m'ont parfois aidé à garder les pieds sur terre. Merci pour sa compréhension dans les moments où le courage me faisait défaut, merci notamment pour son soutien et ses conseils lors de la phase de rédaction du mémoire.

Merci aux autres personnes qui ont participé à mon encadrement scientifique. Je tiens tout particulièrement à remercier Joseph GRIL pour sa participation à mon comité de thèse, et son soutien au cours de cette thèse. Merci pour son invraisemblable disponibilité, pour avoir répondu à mes « questions rapides » et m'avoir appris pratiquement tout ce que je sais en mécanique, pour m'avoir conseillé, relu, corrigé et même traduit. Merci pour son ouverture d'esprit, pour avoir donné de son temps à discuter choses diverses et m'avoir encouragé sans faille.

Merci à Thierry FOURCAUD, qui m'a consacré du temps à parler de mécanique et de modélisation, et qui a participé à mon comité de thèse. Je remercie chaleureusement Christophe GODIN pour avoir participé à mon comité de thèse. Merci surtout pour avoir donné beaucoup de son temps sur un projet de modélisation qui n'a malheureusement pas complètement abouti. Merci pour m'avoir fait

comprendre de nombreuses subtilités du C++ et m'avoir aidé à rédiger la spécification de ce projet, que je regrette de n'avoir pu intégrer à ce mémoire. Merci aussi Pascal FERRARO qui a participé à ce projet en me guidant un peu dans la jungle du C++. Merci d'avoir eu la patience de répondre à mes mails et à mes coups de téléphone, de m'avoir aidé à debugger mes programmes quand j'en ai eu besoin.

Je voudrais également remercier Mériem FOURNIER, sans laquelle ce travail n'aurait jamais vu le jour. Merci pour avoir vu d'emblée combien la biomécanique pouvait apporter à l'arboriculture, pour avoir formulé ce projet, et pour m'avoir mis en route au début de ma thèse. Merci aussi à Olivier DUMONCEAU qui a été pionnier de ce projet lors de son stage de DEA, et qui m'a passé la main généreusement.

Merci à Bernard CHANSON pour m'avoir aidé en anatomie végétale et pour avoir partagé avec moi l'encadrement de deux stagiaires sur le bois d'abricotier. Merci à Géraldine GAY et à Julie MARAN d'avoir effectué leur stage sur certains aspects de mon sujet de thèse.

Merci à Bruno CLAIR pour m'avoir initié à OPTIMAS, et pour s'être investi un moment dans un travail qui l'éloignait de ses préoccupations premières. Merci aussi pour ces sympathiques pauses-café et pour les discussions auxquelles elles ont donné lieu.

Merci à Nick ROWE pour m'avoir permis d'effectuer une partie de mes mesures dans son laboratoire et pour avoir consacré du temps à m'y former.

Merci à l'équipe technique du laboratoire d'arboriculture fruitière, et tout spécialement à Jean-Claude SALLES. Il m'a accompagné au quotidien pendant près d'un an et demi et c'est lui qui a effectué la plus grande partie des mesures sur lesquelles cette thèse est basée. Je le remercie d'avoir fait l'effort de se mettre à des techniques nouvelles, d'avoir eu la patience et l'application nécessaires à la réalisation des diverses tâches pour lesquelles son aide m'a été précieuse. Merci aussi de sa bonne humeur et de ses encouragements.

Je voudrais remercier chaleureusement la secrétaire du laboratoire, Roselyne VANSUYT, pour son efficacité à régler toute question administrative. Merci aussi à Jean-Jacques KELNER pour m'avoir plusieurs fois sauvé la vie en dépannant mon ordinateur. Merci à Dominique FOURNIER pour m'avoir aidé sur les aspects bibliographiques, autant au niveau de la recherche que de la saisie. Merci aussi pour son aide en anatomie et pour la relecture de mon mémoire. Merci à tout le personnel du laboratoire pour son accueil, merci notamment à Manuelle BODIN-FERRI pour son soutien moral et à Chantal BRACHET pour ses réconfortantes pauses-cigarette et sa bonne humeur communicative.

Merci enfin à tous ceux qui m'ont aidé à titre plus personnel. Merci à Marie pour sa compréhension et ses encouragements, et pour le temps qu'elle a passé à relire mon mémoire. Merci à Cyril pour sa compréhension et pour m'avoir convaincu de trouver la force d'aller jusqu'au bout. Merci à toute ma famille pour avoir été un soutien lors de cette thèse. Merci à mes amis qui, en m'écoutant, en me parlant ou simplement en étant là, m'ont accompagné pendant cette thèse. Merci à Elric, Sandrine, Adrienne, Alex, Sylvain, Brigitte, Fred, Pascal et tous les autres.

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire	3
Introduction générale	9
Partie I- Bases bibliographiques, objectif et stratégie d'étude	10
I-1. Architecture aérienne des arbres fruitiers	11
1.1. Importance de l'architecture en arboriculture fruitière.....	11
1.2. Concepts qualitatifs et quantification de l'architecture	12
1.2.1. Architecture aérienne de l'abricotier en développement libre.....	12
1.2.2. Quantification et simulation de l'architecture	15
1.2.3. Interactions entre différentes composantes de l'architecture.....	16
I-2. Eléments de base de la biomécanique des végétaux ligneux.....	18
2.1. Nature et hétérogénéité du bois	18
2.1.1. Fonctionnement du cambium et constitution des cellules ligneuses	18
2.1.2. Le bois de réaction	19
2.2. Biomécanique des axes ligneux en croissance	20
2.2.1. Mesure des caractéristiques mécaniques du bois	21
2.2.2. Modélisation mécanique d'un axe ligneux.....	21
I-3. Objectif et stratégie d'étude.....	25
3.1. Etudes préliminaires	25
3.2. Définition des objectifs.....	25
3.3. Stratégie d'étude.....	25
Partie II- Bases théoriques du calcul de la déformée d'un axe en croissance	27
II-1. Rappel de mécanique : la théorie des poutres	28
1.1. Rappel de rhéologie.....	28
1.1.1. Loi de comportement d'un matériau en sollicitation uniaxiale	28
1.1.2. Loi de comportement d'un matériau en sollicitation tridimensionnelle	29
1.2. Bases de la théorie des poutres	31
1.2.1. Décomposition de la structure en théorie des poutres	31
1.2.2. Champ de déformation d'un élément de poutre	31
1.2.3. Lien entre la structure et le matériau	32
1.2.4. Equilibre d'un élément sous l'action de sollicitations	34
1.2.5. Calcul de la matrice des rigidités.....	36

1.3. Calcul de la déformée d'une poutre encastree.....	39
1.3.1. Formulation du probleme	39
1.3.2. Principe general de la resolution du probleme	39
1.3.3. Deformee d'une poutre droite en flexion pure	40
1.3.4. Cas de donnees plus complexes : necessite de discretiser	42
II-2. Modelisation de la flexion d'un axe sous charge ponderale.....	43
2.1. Modelisation a partir d'une description globale	43
2.1.1. Modele global de description d'un axe sous charge ponderale	43
2.1.2. Calcul de la deformee sous HPP	44
2.1.3. Validation dans le cas du flambement elastique.....	45
2.2. Application au calcul en grands deplacements	46
2.2.1. Représentation schematique du probleme	46
2.2.2. Différents algorithmes de recherche d'une solution numerique	47
2.2.3. Comparaison des methodes de calcul.....	48
2.2.4. Quantification de l'effet des grands deplacements	48
2.3. Modelisation a partir d'une description locale	49
2.3.1. Description de l'axe et du chargement	49
2.3.2. Calcul de la deformee.....	49
2.3.3. Validation et exploitation du modele	50
II-3. Application a la modelisation de la deformation d'un axe en croissance	51
3.1. Effet de la rigidification.....	51
3.1.1. Redressement incomplet d'un element en croissance soumis a une charge temporaire	51
3.1.2. Variation de la courbure de reference d'un element qui se rigidifie	52
3.1.3. Courbure de reference de couches concentriques.....	53
3.2. Effet des deformations de maturation.....	53
3.2.1. Couche concentrique avec distribution plane des DLM.....	53
3.2.2. Couche concentrique avec zone de bois de tension.....	55
3.2.3. Avantages et extension de la methode de la forme de reference	56
3.3. Modelisation de la deformation d'un axe en croissance.....	57
3.3.1. Spécification des donnees de croissance	57
3.3.2. Spécification des parametres de maturation	57
3.3.3. Déroulement des calculs.....	57

Partie III- Mesure des phénomènes impliqués dans la croissance et la flexion des axes d'abricotier de un an 59

III-1. Matériel végétal de l'étude.....	60
1.1. Les variétés étudiées.....	60
1.2. Origine du matériel expérimental	60
1.3. Echantillon principal	61
1.4. Matériel utilisé pour les mesures complémentaires.....	62
III-2. Suivi de croissance/flexion sur l'échantillon principal	64
2.1. Objectif et calendrier du suivi	64
2.1.1. Objectifs	64
2.1.2. Calendrier.....	64
2.1.3. Repérage des mesures locales	65
2.2. Mesure de la morphologie	65
2.2.1. Mesures de diamètre.....	65
2.2.2. Mesure du méplat.....	65
2.2.3. Répétabilité des mesures de diamètre.....	65

2.3. Mesure de la géométrie	66
2.3.1. Utilisation du digitaliseur 3D magnétique.....	66
2.3.2. Répétabilité de la mesure	67
2.3.3. Visualisation des séries de points	67
2.3.4. Validation des mesures.....	68
2.3.5. Transformations géométriques	68
2.4. Mesure du chargement axillaire	68
2.4.1. Différents organes impliqués.....	68
2.4.2. Caractérisation de la morphologie des productions axillaires	69
2.4.3. Allométrie de la masse des fruits.....	69
2.4.4. Allométrie de la masse des pousses courtes	69
2.4.5. Allométrie de la masse des pousses longues	70
2.4.6. Allométrie de la masse de l'axe : masse volumique apparente	70
III-3. Mesure des propriétés mécaniques des matériaux	71
3.1. Choix des méthodes de mesure	71
3.1.1 Principe de la mesure des propriétés mécaniques	71
3.1.2. Echelle d'homogénéisation : choix de la structure mesurée.....	71
3.1.3. Choix du mode de sollicitation.....	72
3.1.4. Choix des dispositifs expérimentaux.....	73
3.2. Mesures sur tronçons d'axes.....	73
3.2.1. Dispositifs de mesure des essais de flexion.....	73
3.2.2. Mise en œuvre des mesures.....	74
3.2.3. Dépouillement des essais.....	75
3.2.4. Inertie de structure d'un tronçon	76
3.2.5. Correction liée à la conicité du tronçon.....	76
3.2.6. Mesure de module de cisaillement en torsion	77
3.3. Essais de flexion sur axes entiers <i>in situ</i>	77
3.3.1. Dispositif expérimental	77
3.3.2. Mise en œuvre des mesures.....	77
3.3.3. Dépouillement des essais.....	78
3.3.4. Dépouillement local d'un essai	78
3.3.5. Dépouillement global d'un essai	78
3.4. Essais de fluage sur axes entiers <i>in situ</i>	79
3.4.1. Dispositif expérimental	79
3.4.2. Mise en œuvre des mesures.....	79
3.4.3. Dépouillement des essais.....	79
III-4. Mesure des déformations de maturation	81
4.1. Méthodes de mesure	81
4.2. Mesures mises en œuvre.....	82
III-5. Etude anatomique.....	84
5.1. Méthodes d'observation	84
5.1.1. Observations microscopiques.....	84
5.1.2. Observations macroscopiques	84
5.1.3. Cartographie des sections.....	85
5.2. Mesures mises en œuvre.....	85
Partie IV- Résultats : quantification des facteurs impliqués	87
IV-1. Morphologie et dynamique de croissance/flexion	88
1.1. Méthodes d'analyse	88

1.1.1. Structuration des données et stratégie d'analyse	88
1.1.2. Automatisation des traitements : calcul de descripteurs et interpolations	89
1.1.3. Proposition de descripteurs de la morphologie.....	90
1.1.4. Proposition de descripteurs de la géométrie	91
1.1.5. Proposition de descripteurs du chargement	92
1.1.6. Présentation des résultats.....	94
1.2. Morphologie et géométrie initiale	95
1.2.1. Analyse de la redondance : choix des descripteurs pertinents.....	95
1.2.2. Distribution des descripteurs	96
1.2.3. Etude conjointe des descripteurs	99
1.2.4. Bilan : caractérisation des variétés	100
1.3. Evolution du chargement.....	100
1.3.1. Relations d'allométrie utilisées pour calculer les masses.....	101
1.3.2. Chronologie du déroulement de la croissance.....	101
1.3.3. Quantification de la croissance des pousses.....	102
1.3.4. Quantification de l'évolution des fruits.....	104
1.3.5. Quantification du chargement total	105
1.3.6. Mise en relation avec la géométrie et la morphologie initiale.....	106
1.3.7. Bilan : caractérisation du chargement	107
1.4. Evolution de la morphologie	107
1.4.1. Quantification de la croissance diamétrale.....	107
1.4.2. Lien entre croissance secondaire et croissance primaire	108
1.4.3. Bilan : caractérisation de la croissance diamétrale	109
1.5. Evolution de la géométrie.....	110
1.5.1. Quantification des phénomènes de flexion et de redressement.....	110
1.5.3. Bilan : caractérisation de l'évolution de la géométrie	112
IV-2. Propriétés mécaniques des matériaux constitutifs des axes.....	114
2.1. Résultats sur tronçons.....	114
2.1.1. Comparaison des essais de flexion 3 et 4 points	114
2.1.2. Mise en évidence d'un biais expérimental	114
2.1.3. Sources de variabilité du module d'élasticité en flexion 3 points	115
2.1.4. Valeurs de module de cisaillement en torsion.....	116
2.2. Résultats des essais de flexion <i>in situ</i> sur axe entier	117
2.2.1. Essais de flexion.....	117
2.2.2. Essais de fluage	117
2.3. Bilan - Conclusions	118
IV-3. Déformations Résiduelles Longitudinales	119
3.1. Résultats	119
3.2. Discussion et conclusions.....	119
3.2.1. Caractère inhabituel des résultats	119
3.2.2. Interprétation de la mesure de DRL	120
3.2.3. Conclusions	121
IV-4. Bois de tension et excentricité	122
4.1. Méthodes de quantification	122
4.1.1. Automatisation des analyses d'images.....	122
4.1.2. Descripteurs de l'anatomie d'une section.....	122
4.2. Identification des éléments anatomiques	123
4.3. Distribution du BT dans l'échantillon principal	124
4.3.1. Analyse globale sur toutes les coupes	124
4.3.2. Approche qualitative de la distribution longitudinale du BT sur 3 exemples	125

4.3.3. Analyse quantitative de la distribution du BT : effet du cerne annuel, de la variété et de la position dans l'axe.....	126
4.3.4. Recherche de facteurs de différenciation de BT.....	128
4.4. Analyse de la distribution du BT dans les axes de l'essai d'arcure.....	129
4.4.1. Intensité de la réaction en fonction des modalités.....	129
4.4.2. Distribution longitudinale du BT.....	129
4.4.3. Réaction à long terme.....	130
4.4.4. Recherche d'un facteur de différenciation du BT.....	130
4.5. Bilan.....	131
Partie V- Validation et exploitation des modèles mécaniques.....	132
V-1. Validation du modèle basé sur des données locales.....	133
1.1. Validation du modèle hors croissance diamétrale (<i>ModelMeca2.1</i>).....	133
1.1.1. Principe de la démarche de validation.....	133
1.1.2. Matériel et méthodes.....	133
1.1.3. Discrimination des hypothèses pertinentes.....	136
1.1.4. Elimination des effets globaux et individuels par ajustement du module.....	137
1.1.5. Bilan.....	138
1.2. Validation du modèle avec croissance diamétrale (<i>ModelMeca2.2</i>).....	139
1.2.1. Simulation sans maturation.....	139
1.2.2. Etude de l'effet des paramètres de maturation.....	141
1.2.3. Simulation avec maturation.....	142
V-2. Quantification et hiérarchisation des facteurs conditionnant les différences variétales..	145
2.1. Quantification de la prédisposition des axes à la flexion.....	145
2.1.1. Indicateur de susceptibilité à la flexion.....	145
2.1.2. Application à la prévision de la flexion avant croissance diamétrale.....	146
2.1.3. Calcul de profil de réponse à un paramètre et de valeurs critiques.....	147
2.2. Quantification de l'effet de la synchronisation entre chargement et croissance radiale....	148
2.2.1. Indicateur de la flexion « figée » par la croissance.....	148
2.2.2. Application à la prévision du redressement à récolte.....	149
2.3. Quantification de l'effet de la maturation.....	150
2.3.1. Indicateur de l'effort de redressement.....	150
2.3.2. Application à la prévision du redressement de fin de saison.....	151
2.4. Validité des modèles analytiques simplifiés.....	152
2.5. Bilan : hiérarchisation des facteurs du port.....	153
Partie VI- Discussion générale, conclusion et perspectives.....	154
VI-1. Originalités et limites du modèle développé.....	155
1.1. Aspects mécaniques (hors croissance).....	155
1.2. Prise en compte de la croissance et de la maturation.....	159
VI-2. Propriétés mécaniques du bois.....	163
2.1. Méthodologie des flexion 3 points sur tronçons.....	163
2.2. Méthodes alternatives sur tronçons.....	164
2.3. Mesures de modules de structure <i>in situ</i>	165
2.4. Valeur et variabilité des propriétés élastiques mesurées.....	166
VI-3. Morphologie et géométrie des axes.....	167

3.1. Représentativité du matériel étudié	167
3.2. Relations entre dimensionnement des axes, flexion et croissance	169
3.3. Importance de la dynamique de croissance radiale	170
VI-4. Réorientations actives et bois de tension	172
4.1. Déformations résiduelles et déformations de maturation	172
4.2. Distribution et rôle du bois de tension.....	175
4.3. Recherche d'une loi de réorientation.....	177
4.3.1. Recherche d'un facteur de différenciation du BT	177
4.3.2. Simulation de lois de réorientations	180
4.3.3. Conclusions	181
VI-5. Portée des résultats et perspectives	183
5.1. Portée des résultats	183
5.1.1. Application de la démarche à d'autres génotypes	183
5.1.2. Limites d'une étude basée sur des axes d'un an.....	184
5.1.3. Intégration dans un cadre d'étude plus large	185
5.2. Perspectives d'application en arboriculture fruitière.....	185
Conclusion générale	188
Bibliographie	189
Liste des figures.....	199
Liste des tableaux	206
Annexes	208
Annexe 1 : Caractérisation de la géométrie d'un domaine du plan par ses moments d'inertie.....	209
Annexe 2 : Lien entre le méplat d'une section et son inertie en flexion	210
Annexe 3 : Formulation du calcul de la déformée d'un axe en flexion pure	211
Annexe 4 : Etude de la répétabilité des mesures de digitalisation	212
Annexe 5 : Inertie de structure d'un tronçon d'axe.....	214
Annexe 6 : Prise en compte de la conicité dans les flexions 3 pts	217
Annexe 7 : Protocole de coloration Bleu Astra / Safranine.....	219
Annexe 8 : Calcul des DLM en fonction des DRLM.....	220
Annexe 9 : Compléments de résultats de simulations	221
Annexe 10 : Publication dans "Trees, Structure and function"	222
Annexe 11 : Listes des codes des descripteurs utilisés	223
Annexe 12 : Rapports extérieurs sur la thèse	226

Introduction générale

L'architecture végétale est une discipline initiée durant les années 1970 à l'institut de botanique de Montpellier. Elle se propose d'identifier les règles qui président à l'établissement des structures végétales, et notamment des arbres. Son succès a donné lieu à diverses applications, dépassant le cadre de la botanique. Trois démarches issues de ces contextes d'application ont notamment émergé à Montpellier.

Dans le domaine de l'agronomie, une meilleure connaissance de la croissance des arbres ne pouvait qu'être profitable à l'arboriculture fruitière. Les recherches menées par l'INRA dans cette discipline se sont orientées vers une meilleure prise en compte des aptitudes naturelles de différentes espèces fruitières, permettant l'émergence de nouveaux modes de conduite.

D'autre part, l'architecture végétale a profité aux sciences du bois. Dans ce domaine, une démarche pluridisciplinaire a été entreprise au Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil de l'Université de Montpellier. La démarche ASMA (« Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre ») a rassemblé des mécaniciens, des anatomistes et des botanistes pour répondre, par une meilleure connaissance de la mise en place du bois dans l'arbre, à différentes questions intéressant directement les technologues du bois autant que les forestiers.

Par ailleurs, au sein du CIRAD, une équipe de recherche a été dédiée à la modélisation de l'architecture des plantes. L'AMAP (« Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes ») a intégré et développé un nombre croissant de concepts botaniques, lui permettant de réaliser des simulations de plus en plus réalistes de la croissance des arbres.

La thèse que j'ai commencée en Janvier 1998 au sein du laboratoire d'arboriculture fruitière de l'INRA-Montpellier est le résultat de la convergences de ces trois démarches. Il s'agissait en effet de réaliser une modélisation biomécanique de l'architecture des arbres fruitiers, jamais entreprise par avant. Plus précisément, cette étude se focalise sur l'établissement de la forme des axes chez l'abricotier. Son objectif est double : il s'agit d'une part de tester la validité des modèles biomécaniques développés auparavant en confrontant les sorties de ces modèles aux observations, et d'autre part d'exploiter les modèles pour identifier les facteurs de la diversité des ports observée entre les différents génotypes de cette espèce.

Partie I- Bases bibliographiques, objectif et stratégie d'étude

La première partie de ce mémoire présente quelques données bibliographiques de base, nécessaires à une bonne compréhension du contexte de travail de cette thèse. Elle permettra de cerner la problématique générale, et de donner quelques définitions. Elle aboutit à une définition des objectifs fixés et de la stratégie adoptée.

Le premier volet est une présentation de l'architecture végétale, dans un contexte d'application aux arbres fruitiers d'une part, et à la simulation informatique d'autre part. Le second volet est une présentation de la biomécanique des végétaux ligneux, sous un angle qualitatif et orientée sur les problèmes d'architecture. Les aspects plus techniques (notamment la mécanique et les méthodes de mesure) selon repris de façon plus détaillée dans les parties II et III.

I-1. Architecture aérienne des arbres fruitiers

1.1. Importance de l'architecture en arboriculture fruitière

Les arbres fruitiers sont caractérisés par une grande diversité architecturale. Cette diversité concerne les lieux de fructification, l'organisation de la ramification et le port des arbres. Ces caractères ont une influence sur de nombreux critères d'intérêt agronomique : productivité, régularité de production, vitesse d'entrée en production, date de floraison et de récolte, qualité du fruit. La prise en compte de cette diversité dans les programmes de recherche fruitière est récente, et se fait principalement par deux voies complémentaires : l'amélioration variétale et l'évolution des modes de conduite.

Les objectifs prioritaires dans les programmes d'amélioration des espèces fruitières sont la résistance aux pathogènes et la qualité du fruit. Les caractères concernant l'architecture de l'arbre ne sont traditionnellement pris en compte que de façon secondaire (Laurens et al. 2000).

Les modes de conduites sont l'ensemble des opérations pratiquées au verger pour orienter la croissance de l'arbre de façon à optimiser sa production. Ces pratiques sont anciennes (Champagnat 1954; Janick 1972; Gautier 1987; Faust et Miller 1992) mais ont connu des évolutions considérables ces dernières années. Traditionnellement, on considérait qu'un arbre devait subir, après la plantation, une taille de formation destinée à lui donner une charpente. Différents types de taille de formation ont été distingués. Les uns sont basés sur l'imposition aux arbres d'une forme entièrement artificielle, à l'aide de piquet, tuteur, fils de fer. Ce sont les formes palissées, tels que le drapeau, la palmette, le fuseau. L'autre type de taille de formation consiste à sélectionner et à favoriser sur le jeune arbre quelques pousses vigoureuses, qui formeront la charpente. Cette taille aboutit à des formes telles que le gobelet. Les opérations de conduite ultérieures visent à maîtriser la croissance de l'arbre et à favoriser la fructification. Ces opérations mettent en œuvre des pratiques diverses qui dépendent de l'espèce et de la région de production. Deux types d'intervention sont pratiqués sur les rameaux : leur suppression par la taille et leur manipulation qui consiste à les arquer ou à les incliner. La taille vise à entretenir la structure de l'arbre et à renouveler les unités de production. La taille d'hiver a pour effet de favoriser le démarrage de nouveaux rameaux, et doit être répétée tous les ans. L'arcure permet généralement de favoriser la floraison et la mise à fruits au détriment de la croissance végétative.

La tendance actuelle est de chercher des modes de conduite permettant d'augmenter la densité de plantation et de minimiser les interventions au verger, coûteuses en main d'œuvre. De ce fait, les modes de conduites en axe (ou en « central leader » des anglo-saxons) ont progressivement été préférés, notamment chez les espèces à pépins (Faust et Miller 1992). Les travaux de recherche sur le pommier au cours de ces dernières décennies ont amené à une évolution des modes de conduite favorisant l'arcure, et permettant à la fois une meilleure mise à fruit, une plus grande régularité de production, une maîtrise de la croissance végétative et le renouvellement des structures de production (Lauri et Lespinasse 1998; Lauri et Lespinasse 1999; Lauri et Térouanne 1999). La mise au point de ces modes de conduite a été possible grâce à une meilleure prise en compte des potentialités propres du végétal, et notamment par l'étude de son architecture aérienne. Des démarches analogues ont été entreprises sur l'abricotier (Jay et al. 1995a; Lichou et Jay 1996; Costes 1999). Dans ce contexte, la recherche de variétés exprimant naturellement l'arcure est devenue un des objectifs de l'amélioration variétale.

1.2. Concepts qualitatifs et quantification de l'architecture

L'architecture végétale, discipline développée au début des années 1970 (Hallé et Oldeman 1970), est dédiée à l'analyse de la stratégie de croissance des végétaux. Elle a permis d'identifier, au sein de la diversité de structures exprimées par les arbres des régions tempérées et tropicales, 23 « modèles architecturaux » caractérisés par un ensemble de règles d'édification communes (Hallé, Oldeman et Tomlinson 1978). Sa mise en œuvre est basée sur l'observation de différents caractères botaniques et morphologiques. Les caractères observés concernent le mode de croissance des axes, leur mode de ramification, leur différenciation morphologique et la position de la sexualité (Barthélémy, Caraglio et Costes 1997). La démarche de l'analyse architecturale sera ici illustrée par l'exemple de l'abricotier.

1.2.1. Architecture aérienne de l'abricotier en développement libre

L'abricotier (*Prunus armeniaca*) appartient à la famille des rosacées. Son analyse architecturale a été réalisée par Costes (1993). Elle aboutit à une caractérisation générale de la stratégie de croissance de l'espèce. Ceci implique l'identification des divers niveaux d'organisation qui constituent l'arbre entier, la caractérisation des types d'organes observés et l'établissement des règles qui président à l'agencement des organes entre eux. Cette analyse, commune à tous les individus de l'espèce indépendamment de leur génotype et de leurs conditions de culture, a une valeur très générale. L'expression quantitative de ces règles, et leur variabilité, permet de rendre compte de la diversité observée.

Nous nous attacherons surtout ici à présenter les aspects structuraux de l'organisation du système aérien d'abricotier. Le lecteur désireux d'approfondir les aspects morphologiques se reportera à Costes (1993) et Jay et al. (1995a et 1995b). Pour chaque niveau d'organisation considéré, nous présenterons les caractéristiques des organes végétatifs, ainsi que leurs liens avec le niveau d'organisation qui les englobe et celui qu'ils englobent.

➤ Le métamère

Il constitue l'organe élémentaire à partir duquel la plante se construit. White (1979), le définit comme un ensemble comprenant le nœud, la (ou les) feuille(s), les zones méristématiques situées à son aisselle et l'entre-nœud sous-jacent. Dans le cas de l'abricotier, il comprend une seule feuille, axillée dès sa mise en place par un bourgeon végétatif. Celui-ci est protégé par deux préfeuilles, à l'aisselle desquelles apparaissent des zones méristématiques qui peuvent évoluer en bourgeons floraux. Par abus de langage, et à la suite de nombreux auteurs, le métamère sera désigné par le terme d'entre-nœud.

➤ L'unité de croissance

L'abricotier a une croissance rythmique et définie. Une phase de croissance se termine donc toujours par la mort de l'apex. L'unité de croissance (UC) est la portion d'axe comprenant l'ensemble des métamères mis en place par le même méristème durant une phase de croissance.

Les métamères sont mis en place selon une phyllotaxie spiralée d'indice 2/5 quelle que soit l'orientation (verticale, oblique ou horizontale) de l'axe considéré. Les métamères produits par l'apex ne sont pas tous identiques, ni d'un point de vue morphologique, ni d'un point de vue fonctionnel. Les tous premiers mis en place (à la base de l'UC) sont pourvus de cataphylles (feuilles réduites, non assimilatrices, sans bourgeon visible à leur aisselle), leurs entre-nœuds sont peu ou pas allongés. Les premiers entre-nœuds allongés sont pourvus de feuilles réduites, et le plus souvent dépourvus de bourgeons floraux. Ils correspondent à la partie préformée de l'UC, c'est à dire la partie dont l'organogenèse a eu lieu dans le bourgeon hivernal. Ils ont de faibles potentialités sexuelles (seuls les derniers sont pourvus de bourgeons floraux) et leurs bourgeons végétatifs restent le plus souvent

latents. Les métamères suivants sont pourvus de feuilles dont la surface croît puis se stabilise. Ces métamères correspondent à la partie néoformée de l'axe, c'est-à-dire qu'ils ont été entièrement mis en place (organogenèse et déploiement) pendant la période de croissance. A l'aisselle de leurs feuilles on trouve un bourgeon végétatif pourvu d'écaillés à l'aisselle desquelles se développent les bourgeons floraux.

Le nombre de métamères contenus dans la partie préformée semble être une caractéristique variétale (Jay et al. 1995a). En revanche, l'expression de la néoformation est hautement dépendante des conditions de croissance de l'UC. Le passage en néoformation n'est pas une généralité : en réalité, la plupart des pousses cessent leur croissance avant cette étape. Ces pousses, constituées seulement d'une partie préformée, sont nommées pousses courtes (ou bouquets de Mai) si les entrenoeuds sont peu allongés (environ 5 cm en tout), brindilles si les entrenoeuds sont allongés (5 à 15 cm). Nous les désignerons de façon commune par le terme de « pousse courte ». Les unités de croissance qui poursuivent en néoformation donnent naissance aux pousses longues. Le passage entre zone préformée et zone néoformée n'est pas toujours distinct chez l'abricotier. Il est parfois marqué par la présence d'un nœud et/ou d'une feuille réduite.

A la mort de l'apex (qu'elle soit naturelle - fin d'UC - ou traumatique), la croissance de la tige est relayée par le bourgeon situé juste en dessous. Celui-ci se développe dans le prolongement de l'axe qui lui a donné naissance et établit une nouvelle unité de croissance. Le temps de latence entre deux cycles de croissance est variable (de quelques jours à quelques mois). Cette propension à réaliser plusieurs cycles de croissance dans une année fait de l'abricotier une espèce polycyclique.

La ramification est en général proleptique, c'est à dire que les bourgeons mis en place ne démarrent leur croissance qu'après une période de repos. Cependant quand la pousse a une croissance rapide et importante, il arrive que, malgré la présence de l'apex, les bourgeons situés dans la partie médiane à distale de l'axe aient un départ immédiat. On parle alors de ramification sylleptique. Le rameau qui en résulte, mis en place la même année que son porteur, est appelé rameau sylleptique ou anticipé.

➤ La pousse annuelle

La pousse annuelle est définie comme l'ensemble des UC appartenant à un même rameau mises en place entre deux périodes hivernales. La pousse annuelle d'abricotier contient en général 1 à 3 UC, rarement 4. On peut en principe la distinguer par la présence de cataphylles nombreuses et dures à sa base, traces laissées par le bourgeon hivernal. Du fait de l'indétermination du nombre de métamères mis en place dans la partie néoformée d'une UC, une pousse annuelle constituée de nombreux entrenoeuds peut résulter d'une seule UC longue ou de plusieurs UC ayant chacune un nombre variable d'entrenoeuds.

Le repos hivernal est une période de réorganisation de la pousse annuelle. A ce moment, les bourgeons en place, qui ont réalisé l'organogenèse de leur partie préformée et l'induction florale pour les bourgeons floraux, acquièrent l'aptitude à exprimer leur potentialités. L'acquisition de cette aptitude passe par la satisfaction de besoins en froid, réalisée au cours de la phase de levée de dormance hivernale. Au printemps suivant, la floraison s'installe tout le long de la pousse sauf au début de la partie préformée des premières UC des pousses longues, et la plupart des bourgeons végétatifs démarrent par le déploiement de leur partie préformée. Notons que la floraison se fait toujours sur les parties végétatives mises en place l'année précédente, et qu'elle précède le débourrement. Une description détaillée de la mise en place des fleurs et de la croissance du fruits peut être trouvée dans Costes et al. (1995a). Nous retiendrons que le développement du fruit se fait en une première phase de

grossissement, suivie d'une phase de durcissement du noyau pendant laquelle la croissance est faible, puis d'une phase finale de grossissement du fruit.

➤ **La tige et les rameaux**

L'allongement des tiges et des rameaux se fait par empilement des UC produites par les années successives. Il implique donc toujours l'intervention d'un nouveau bourgeon, qui donne naissance au prolongement. C'est en cela que la ramification de l'abricotier est dite sympodiale. Le niveau tige/rameaux permet de définir un ordre apparent de ramification.

La direction de croissance des tiges est le plus souvent verticale à l'origine. La flexion des axes sous leur poids propre, ainsi que sous celui du feuillage et des fruits, entraîne une modification de cette orientation. La partie distale de la tige, parfois même la totalité de celle-ci, adopte alors une direction plus ou moins horizontale.

Il convient de distinguer à ce niveau les rameaux longs (qui forment les tiges et les rameaux *sensu stricto*) des rameaux courts. Ceux-ci sont constitués de l'empilement de pousses courtes sur plusieurs années. Ils ne sont en général pas ramifiés. Leur durée de vie est courte, et ils s'élaguent naturellement en quelques années.

Dans un plant issu de semis, la plante se construit d'abord par addition de pousses annuelles de plus en plus longues. Cette phase d'établissement est nommée effet de base (Barthélémy et al. 1997). Dans une seconde phase, marquée par l'apparition de la sexualité, la longueur des pousses annuelles tend à se stabiliser. Enfin, lorsque l'arbre est bien développé, l'importance des pousses annuelles décroît, par disparition de la syllepsie, puis par une raréfaction du polycyclisme et une baisse du nombre de métamères par UC, jusqu'à atteindre le stade où chaque pousse annuelle se réduit au déploiement de la partie préformée. Cette phase de décroissance de la pousse annuelle est appelée dérive (De Reffye, Elguero et Costes 1991).

Les différentes phases que nous venons d'identifier sont valables pour un arbre en port libre issu de semis. Les pratiques culturales sont susceptibles d'occulter ou de modifier certaines d'entre elles. En particulier, le greffage raccourcit la première phase (ce qui mène à une acquisition plus rapide de la sexualité). La taille permet de rajeunir la structure en évitant la dérive. L'arcure, au contraire, accélère le processus de dérive.

➤ **Le système ramifié élémentaire**

Le système ramifié élémentaire d'abricotier est composé d'une tige érigée et de ses systèmes ramifiés latéraux. Toutes les catégories d'organes y sont rencontrées, il correspond donc au diagramme architectural (Edelin 1977). La disposition et l'importance des productions latérales est variable mais obéit globalement à un gradient acrotone. La quantité de rameaux longs est en général supérieure pour l'UC terminale de la pousse annuelle. Au sein de chaque UC, on observe aussi un gradient acrotone de développement des latéraux : les rameaux longs sont en général situés en fin d'UC, alors que la partie médiane contient des séries de productions courtes (bouquets de mai et brindilles), séparées par des bourgeons latents. Ainsi, les latéraux subterminaux de l'UC terminale d'une pousse annuelle ont un développement comparable à celui du prolongement, au point que l'identification d'un relais et d'un ordre de ramification peut être difficile.

La règle d'acrotonie doit cependant être nuancée. Le ploiment du rameau, en particulier, perturbe les gradients de ramification. Il peut en résulter la présence de rameaux importants dans des positions médianes des UC. Ce phénomène a été observé chez de nombreuses autres espèces, en particulier le pommier, (Lakhoua et Crabbé 1975a), et a été appelé gravimorphisme (nous y reviendrons dans ce qui suit).

➤ **L'arbre entier**

L'abricotier se construit conformément au modèle de Champagnat par superposition de systèmes ramifiés élémentaires. Ces systèmes dérivent les uns des autres par le processus de réitération (Oldeman 1974). En effet, suite à la flexion des axes principaux des systèmes ramifiés, le développement de l'arbre se poursuit par le développement de complexes réitérés qui se forment dans la partie médiane des tiges arquées. Ces complexes sont initiés par le départ d'un rameau vigoureux (parfois qualifié de gourmand) à partir, soit d'un bourgeon latent, soit du bourgeon apical d'un rameau déjà présent dans la zone favorable. L'importance du développement ultérieur d'un complexe réitéré dépend de sa position dans l'arbre et sur sa structure porteuse. L'absence de hiérarchie entre les systèmes ramifiés est conforme à la notion de plan d'organisation polyarchique (Edelin 1991).

1.2.2. Quantification et simulation de l'architecture

L'application de l'analyse architecturale à de nombreuses espèces, tropicales et tempérées, a permis l'émergence de concepts qui ont été traduits dans des logiciels de simulation de l'architecture des arbres (Prusinkiewicz et al. 1997; Prusinkiewicz 1998; De Reffye et Houllier 1998). En particulier, la proposition du concept d'axe de référence (De Reffye, Dinouard et Barthélémy 1991), a permis de rendre compte et de simuler les gradients architecturaux (Barthélémy et al. 1997). Cette démarche correspondait à un souci de réalisme et a permis d'intégrer les règles de développement de l'architecture des arbres dans les logiciels de simulations, alors que ces règles n'étaient pas considérées dans des modèles plus conceptuels (Fisher et Honda 1977; Honda et Tomlinson 1982; Borchert et Honda 1984).

L'analyse architecturale, basée sur une description qualitative des règles de développement de l'arbre, ne peut cependant pas rendre compte de toutes les spécificités observées dans le règne végétal. En effet, différentes espèces, obéissant à des règles d'édification communes, peuvent présenter une grande diversité de forme. Cette diversité résulte de l'expression quantitative de certains caractères, comme la position et l'orientation des organes, leurs dimensions, l'allongement des axes et la place de la ramification.

Pour en tenir compte dans la simulation de l'architecture, il était nécessaire de disposer de données sur l'expression quantitative de ces différents processus en fonction de la position architecturale des axes. Ces données ont été collectées lors de mesures faites sur plusieurs espèces, dont notamment l'abricotier. Les processus d'allongement et de ramification ont été quantifiés en analysant le nombre de feuilles des unités de croissance en fonction de leur position architecturale (De Reffye et al. 1991), puis en explorant l'organisation naturelle de la ramification (Costes et al. 1992). Ces travaux ont conduit à la construction de modèles stochastiques ayant pour objectif de rendre compte des phénomènes observés. La rythmicité de la croissance primaire a été modélisée par la théorie du renouvellement (Guédon et Costes 1997), alors que des modèles Markoviens ont été développés pour rendre compte des schémas de ramification le long des pousses annuelles (Costes et Guédon 1997; Guédon, Costes et Caraglio 1998; Guédon et Costes 1999).

La mesure de la position et l'orientation des organes dans l'espace a été effectuée d'abord manuellement par des techniques de triangulation (Chambon 1995; Dumonceau 1995). L'utilisation d'un digitaliseur magnétique et le développement d'un logiciel de saisie des données ont permis d'améliorer nettement et d'automatiser en partie la mesure (Sinoquet, Rivet et Drouet 1997; Adam et al. 2000). Les données tridimensionnelles peuvent maintenant être modélisées à l'aide de représentations paramétriques (Boudon 2000).

Afin de stocker les données quantitatives mesurées, en conservant l'information sur leur position architecturale, il a été nécessaire de développer un formalisme permettant de se repérer sur une structure arborescente. La recherche d'un tel formalisme relève de la topologie, c'est à dire de l'étude des relations entre les différentes entités constitutives de l'arbre. La démarche méthodologique conduite par l'Unité de Modélisation des Plantes du CIRAD a abouti à l'utilisation de MTG (Multi-scale Tree Graphs), permettant de coder la topologie d'un arbre en tenant compte de divers niveaux d'organisation (Godin et Caraglio 1998). Cette démarche fait suite à une première tentative de codage des structures végétales (Rey, Godin et Guédon 1997), et s'est concrétisée par la création d'un logiciel de base de donnée associés à divers outils d'analyse. Ces logiciels, regroupés sous le nom AMAPmod, sont dédiés à la représentation, l'exploration et la modélisation des données architecturales (Godin et al. 1997; Godin, Guédon et Costes 1999).

Les démarches présentées ont amené des avancées dans la quantification et la représentation des principales manifestations de l'architecture des plantes (géométrie des axes, processus d'allongement de ramification). Elles permettent d'envisager un plus grand réalisme dans les logiciels de simulation. Ces logiciels évoluent actuellement vers la prise en compte de l'interaction entre ces les différentes phénomènes.

1.2.3. Interactions entre différentes composantes de l'architecture

D'un point de vue biologique, la forme des axes, leur allongement et leur ramification ne sont pas des phénomènes indépendants (figure 1).

L'interaction entre la forme des axes et les processus de croissance a été abondamment étudiée sur les arbres fruitiers. Wareing (Wareing et Nasr 1958) a introduit le terme de « gravimorphisme » pour désigner la réaction de croissance d'un axe à un stimulus gravitationnel. En inclinant et en arquant artificiellement des axes de différentes espèces fruitières, il a observé une réduction globale de la vigueur des axes (notamment de l'allongement des tiges), une stimulation de la ramification et l'établissement une distribution dorsio-ventrale marquée de celle-ci, ainsi qu'une stimulation de la floraison (Wareing et Nasr 1958). Il a ultérieurement montré que cette réaction était liée à l'orientation des axes par rapport à la gravité, et non à un stimulus mécanique ou lumineux (Smith et Wareing 1964). La théorie en place, essentiellement basée sur le concept de dominance apicale, s'est avérée insuffisante pour expliquer ces observations. Différentes théories, basées sur le transfert de substances de croissance dans les axes, ont suivi ces travaux pour tenter d'expliquer les réactions gravimorphiques observées (Smith et Wareing 1964; Mullins 1965; Borkowska 1966; Smith et Wareing 1966; Jankiewicz, Antoszewski et Klimowicz 1967). Il en ressort que la perception du stimulus gravitationnel est réalisée au niveau du bourgeon, et renforcée par une inhibition corrélative au sein de l'axe (Borkowska et Jankiewicz 1972) résultant d'un effet acrotone conditionné par la dominance apicale et d'un effet de base attribué à un facteur racinaire (Smith et Wareing 1964). Ces travaux ont été ultérieurement confirmés et étendus par de nouvelles expériences sur pommier (Lakhoua et Crabbé 1975a, 1975b, et 1975c; Crabbé et Lakouah 1978; Lauri et Lespinasse 1999 et 2001).

Un second exemple d'interaction entre forme et allongement est l'existence de tropismes. L'allongement d'un axe ne se fait pas toujours dans la direction de son prolongement. Une plante est capable de modifier la direction de croissance de ses axes en réponse à différents stimuli, notamment la lumière (phototropisme) et la gravité (gravitropisme).

Par ailleurs, la place et l'abondance des ramifications a elle même une influence sur la forme de l'axe. Cette interaction résulte de la flexion des axes sous le poids de leurs axillaires. Son étude relève de la biomécanique, qui est l'objet du chapitre suivant de ce mémoire.

I-2. Eléments de base de la biomécanique des végétaux ligneux

Chez les végétaux ligneux, la fonction de soutien est essentiellement assurée par le bois. Le bois donne aux tiges leur rigidité, et est à l'origine d'un mécanisme particulier de réorientation. Avant d'aborder les aspects mécaniques de ces deux fonctions et leur modélisation, nous allons faire un bref rappel sur la nature du bois, sa mise en place et son hétérogénéité.

2.1. Nature et hétérogénéité du bois

2.1.1. Fonctionnement du cambium et constitution des cellules ligneuses

L'allongement des axes se fait par l'intermédiaire de divisions cellulaires qui ont lieu au niveau de l'apex, dans une zone de tissu embryonnaire qui constitue le méristème apical ou méristème primaire. La croissance en épaisseur est assurée par le fonctionnement d'un méristème secondaire, le cambium. Le cambium est une assise cellulaire constituée de cellules indifférenciées, formant un manchon continu à la périphérie du bois. Lorsque le cambium est actif, ses cellules se divisent dans la direction tangentielle, de part et d'autre de l'assise (figure 2). Les divisions qui ont lieu sur la face interne du cambium forment des cellules qui constitueront le bois (ou xylème secondaire). Les divisions sur la face externe formeront un tissu périphérique de l'axe, le liber (ou phloème secondaire). Le cambium reste donc toujours situé à la périphérie du bois, sous le liber. Une autre type de division, cette fois dans la direction radiale, assure la continuité du cambium et lui permettent d'augmenter sa circonférence parallèlement à celle du bois (Kozłowski 1971).

Les divisions tangentielles forment des files de cellules alignées selon les rayons de la section. Après division, les cellules du cambium, initialement indifférenciées, subissent une phase de différenciation, au cours de laquelle elles acquièrent des caractéristiques spécifiques. La différenciation centrifuge donne naissance aux cellules du liber, qui assurent notamment la conduction de la sève élaborée dans l'arbre. La différenciation centripète donne naissance aux différents types de cellules qui assurent les multiples fonctions du bois. Les cellules du parenchyme permettent le stockage et le transfert des réserves carbonées (Jodin 1994). On distingue le parenchyme vertical, constitué de cellules allongées, alignées parallèlement à l'axe des tiges, et le parenchyme horizontal (ou rayons ligneux), constitué de cellules peu allongées et qui sont alignées dans la direction radiale. Les autres cellules assurent la fonction de soutien et la conduction de la sève brute. Chez les gymnospermes, ces deux fonctions sont assurées par un même type de cellules, les trachéides. Chez les angiospermes, la conduction est assurée par les vaisseaux et la fonction de soutien par les fibres. Les angiospermes présentent aussi des éléments intermédiaires, appelés trachéides et fibres tachéides, qui participent aux deux fonctions.

Ces différents éléments (trachéides, vaisseaux et fibres) sont soudés entre eux par la lamelle moyenne, un « ciment » intercellulaire constitué de pectines, qui assure le contact entre les membranes primaires de cellules adjacentes. Une paroi secondaire, épaisse et rigide, se dépose à l'intérieur des cellules une fois qu'elles ont atteint leur taille définitive. La cellule meurt et se vide de son cytoplasme, laissant un vide appelé lumen. La paroi secondaire est constituée de différentes couches cellulolusiques (figure 3), nommées S1, S2 et S3 (Kozłowski 1971). La cellulose est organisée au sein des couches sous forme de microfibrilles, qui sont parallèles entre elles, mais dont l'orientation peut être différente entre les couches. Lors de la maturation de la cellule, qui se produit dans les semaines qui suivent leur différenciation, différents composés (lignines, hémicelluloses) se déposent dans la paroi, imprégnant les microfibrilles d'une matrice amorphe qui donne à la paroi sa rigidité (Kozłowski 1971). La phase

de maturation s'accompagne d'une tendance de la cellule à se gonfler dans sa direction transverse et à se raccourcir dans sa direction longitudinale (Archer 1986). Après cette phase, la constitution et les propriétés des cellules n'évoluent pratiquement plus jusqu'à la mort de l'arbre.

L'activité cambiale dans l'arbre n'est pas un processus homogène, ni dans le temps, ni dans l'espace. En région tempérée, le cambium est inactif pendant l'hivers. La réactivation cambiale a lieu plus ou moins tôt dans l'année selon les espèces. Selon Koslowski, l'activité cambiale commence à la sortie de la dormance hivernale, et se prolonge plus ou moins tard dans l'année. Elle n'est pas nécessairement synchrone dans tout l'arbre (Koslowski 1971; Lachaud 1986). Chez les angiospermes, la nature des cellules différenciées évolue au cours de la saison : le bois produit au printemps (« bois initial ») est généralement riche en vaisseaux, et celui produit en été (« bois final ») plus riche en fibres. L'aspect saisonnier de la croissance cambiale se traduit au niveau macroscopique par l'existence de cernes annuels. La disposition des éléments cellulaires (fibres et vaisseaux) dans le cerne annuel est un critère de classification et de reconnaissance des bois. On distingue ainsi les bois à pores diffus ou semi-diffus, qui présentent des vaisseaux à différents niveaux du cerne annuel, et les bois à zone initiale poreuse, chez lesquels les vaisseaux sont rassemblés au niveau du bois initial (Jodin 1994).

L'hétérogénéité de l'activité cambiale se traduit aussi par des variations circonférencielles de l'épaisseur des cernes annuels. Ces variations ont deux types de manifestations : le méplat et l'excentricité (figure 4). Le méplat provient d'un accroissement privilégié selon deux directions opposées, se traduisant par une ovalisation de la section. L'excentricité provient d'un accroissement dans une seule direction, et se traduit par le fait que la moelle n'est plus située au centre de la section.

2.1.2. Le bois de réaction

Une autre manifestation de l'hétérogénéité circonférencielle de l'activité cambiale est la production de bois de réaction. Ce tissu particulier est nommé « bois de compression » chez les conifères et « bois de tension » chez les feuillus. Le bois de compression est constitué de cellules à parois épaisses et fortement lignifiées (Koslowski 1971). On peut le distinguer dans une section à l'œil nu par sa couleur. Le bois de tension est constitué de cellules particulières, dites fibres gélatineuses (ou « fibre G »), dont les parois contiennent une couche caractéristique : la « couche G ». Cette couche épaisse, constituée presque exclusivement de cellulose, est située après la couche S3 (ou se substitue à elle chez certaines espèces, Koslowski 1971). Le bois de tension n'est pas toujours distinct à l'échelle macroscopique. Il présente par contre un aspect particulier en microscopie, du fait de l'épaisseur et de l'aspect gélatineux de sa paroi, et peut être mis en évidence par diverses colorations (Wicker 1979).

Toutes les espèces ne produisent pas de bois de réaction. Lors d'une étude sur 122 espèces de feuillus, des fibres G ont été identifiées chez 56 espèces (Ficher 1981). Chez les espèces qui en produisent, le bois de réaction est typiquement formé dans les troncs et les branches inclinés. Il est distribué de façon asymétrique dans les cernes annuels, et se présente sous forme de croissants d'extension tangentielle et radiale variable. En général, le bois de compression se forme dans la moitié inférieure des sections, et le bois de tension dans la moitié supérieure (Wicker 1979). Ces distributions typiques doivent cependant être nuancées. On trouve fréquemment du bois de tension dans des axes verticaux des feuillus (Wilson et Archer 1977). On le trouve parfois alternativement d'un côté et de l'autre entre cernes successifs ou au sein d'un même cerne. Cependant, il n'est en général pas présent des deux côtés à la fois pour une couche de bois mise en place à un moment donné.

Il est reconnu que le bois de réaction joue un rôle dans la réorientation des tiges. Cette action se fait grâce à un comportement particulier de ces cellules lors de la maturation. Ces cellules de bois de tension, lors de la maturation, ont une tendance au retrait longitudinal beaucoup plus marquée que

celles du bois normal (Archer 1986). Le bois de tension étant présent d'un seul côté de la tige, ces « déformations de maturation » asymétriques créent une tension plus importante d'un côté que de l'autre, qui tend à courber la tige (figure 5). Inversement, le bois de compression a une tendance à l'expansion longitudinale lors de la maturation, qui crée une compression sur la face inférieure de la tige. Cette compression, couplé à la légère tension induite par le bois normal sur la face supérieure, tend aussi à courber la tige dans le sens d'un redressement (Wilson et Archer 1977; Archer 1986). Ce mécanisme permet aux tiges inclinées de se redresser.

Les causes de la formation de bois de réaction sont par contre beaucoup moins claires. De nombreux auteurs se sont penchés sur la recherche du stimulus responsable de sa différenciation. Deux hypothèses ont dominé dans la recherche de ce stimulus. Sous la première hypothèse (stimulus mécanique), le bois de tension est produit en réponse aux contraintes ou aux déformations subies par l'axe. La seconde hypothèse (stimulus gravitationnel) suppose que le bois de tension se forme suite à une perception par l'axe de sa position dans le champ de pesanteur. Deux versions de cette hypothèse ont été formulées, selon qu'on suppose que la réaction dépend de l'inclinaison de l'axe par rapport à la verticale (Robards 1965; Robards 1966), ou qu'elle dépend de l'écart à une inclinaison non verticale, supposée être la « position d'équilibre » de la branche (Wilson et Archer 1977).

Cette question a donné lieu à un grand nombre d'expérimentations réalisées dans l'objectif de discriminer l'action de différents stimuli (Wilson et Archer 1977). Les expériences ont été construites pour tenter de confirmer l'une des hypothèses, en inclinant ou en courbant des branches dans diverses positions (Sinnot 1952; Robards 1965; Robards 1966; Wilson et Archer 1977; Fisher 1985). Les résultats de ces expérimentations n'ont pas permis de trouver un consensus. Il semble qu'aucune des deux hypothèses ne puisse expliquer à elle seule l'ensemble des réactions observées (Wilson et Archer 1977; Fisher 1985). Cependant, de nombreux résultats vont dans le sens d'une dépendance prépondérante au stimulus gravitationnel (Wilson et Archer 1977; Fisher 1985).

En outre, deux faits semblent être acquis. D'une part, les distributions de bois de tension obtenues sur des axes fléchis de façon complexes (boucles, inflexions...) montrent que le stimulus est perçu localement dans l'axe (Wilson et Archer 1977). D'autre part, l'ensemble des observations sur des axes déplacés de leur position initiale montrent que le bois de tension apparaît toujours là où son action implique un retour à cette position initiale (Wilson et Archer 1977; Wicker 1979).

2.2. Biomécanique des axes ligneux en croissance

Le fait que les arbres restent le plus souvent dressés au cours de leur développement nous paraît un élément naturel. Du point de vue du mécanicien, pourtant, ce fait peut apparaître plus surprenant : les arbres sont des structures extrêmement élancées, soumises en permanence à des sollicitations diverses, telles que le vent, le poids de la neige, leur poids propre, celui du feuillage et des fruits.

Les aspects mécaniques de la croissance des arbres ont différents domaines d'application. Dans le domaine de l'écologie et de l'évolution, on s'intéresse au lien entre la structure des arbres et son adaptation au milieu naturel (Niklas et Kerchner 1984; Niklas 1994). Dans le domaine forestier, la mécanique des arbres a des implications pratiques directes : qualité du bois, éclatement des billons à l'abattage, déformation des planches au sciage... (Thibaut 1989).

D'un point de vue mécanique, l'arbre est un objet complexe. La complexité de sa structure arborescente résulte de son mode de croissance et de ramification, et peut être abordée par les concepts de l'architecture végétale. Le principal matériau constitutif des arbres, le bois, présente une grande complexité structurale et une importante hétérogénéité au sein de l'arbre. Son étude relève de

l'anatomie végétale. La convergence des différentes disciplines impliquées dans la mécanique de l'arbre a donné lieu à Montpellier, au début des années 1990, à un ensemble de travaux concrétisés par la démarche ASMA (« Architecture, Structure et Mécanique de l'Arbre »). L'objectif de cette démarche était d'intégrer des connaissances provenant de ces disciplines, afin d'apporter des éléments de réponse à diverses questions, intéressant tout autant les biologistes que les technologues du bois.

2.2.1. Mesure des caractéristiques mécaniques du bois

Ces recherches ont amené à caractériser la variabilité de différentes caractéristiques mécaniques du bois dans l'arbre. Certaines de ces caractéristiques peuvent être mesurées directement. C'est le cas des propriétés mécaniques du bois, qui caractérisent la résistance du matériau à la rupture ou aux déformations. Ces propriétés peuvent être mesurées par diverses méthodes, bien connues et éprouvées dans le domaine de la technologie du bois.

Un autre exemple est la valeur des « déformations résiduelles longitudinales de maturation » (DRLM). Au cours de la maturation, les cellules du bois ont naturellement tendance à se déformer, dans le sens d'une contraction longitudinale (faible pour le bois « normal » et forte pour le bois de tension) ou d'une dilatation longitudinale (cas du bois de compression). La nouvelle couche de bois étant solidaire des couches précédentes, la déformation longitudinale de maturation (DLM) ne peut pas s'y exprimer librement. Il y a « conflit » entre la nouvelle couche, qui tend à se déformer, et les couches précédentes, rigides, qui s'opposent à cette déformation. En règle générale, la nouvelle couche, du fait de sa faible épaisseur, est beaucoup moins rigide que l'ensemble de couches en place. Les DLM sont donc en grande partie « bloquées », et la nouvelle couche se trouve dans un état contraint. Cette contrainte peut s'observer à la périphérie d'un arbre, en désolidarisant localement une partie de la couche de bois. Les contraintes bloquées sont alors libérées, et on constate une contraction ou une dilatation de la portion de bois désolidarisée. En mesurant cette déformation, on a accès à la valeur des DRLM. La pratique de cette mesure a permis d'estimer la valeur des DLM pour différentes espèces, et en différents points d'un arbre. Les mesures faites en différents points de la circonférence à un même niveau de l'arbre ont souvent une distribution caractéristique, présentant un pic dans une direction donnée. L'étude parallèle de l'anatomie des axes sur lesquels ces mesures ont été pratiquées a permis de mettre en relation la position de ce pic de déformation et la présence de bois de tension.

2.2.2. Modélisation mécanique d'un axe ligneux

Les mesures permettent un accès direct aux caractéristiques mécaniques du bois dans l'arbre. Cependant, certaines caractéristiques ne peuvent pas être mesurées directement. Par exemple, les méthodes de mesure classiques des propriétés mécaniques nécessitent le prélèvement de l'organe, et ne peuvent donc pas être mises en œuvre *in vivo*. Un autre exemple est l'état des contraintes périphériques qui apparaissent le long du tronc d'un arbre sous l'effet du vent. Cette information, inaccessible en pratique, est précieuse en écologie forestière. Elle permet de faire de lien entre la morphologie de l'arbre et la localisation des contraintes maximales ou l'intensité maximale du vent qu'il peut supporter, dans le but de déterminer la sensibilité de l'arbre ou d'interpréter son dimensionnement en terme d'optimalité. De même, l'état des contraintes à l'intérieur d'un tronc, qui a des conséquences directes sur la valorisation du produit, ne peut être mesuré directement. Dans ces différentes situations, la modélisation mécanique permet un accès indirect à l'information.

La mécanique des solides fournit le cadre théorique de cette modélisation. Elle permet de prévoir les contraintes et les déformations au sein d'une structure donnée, compte tenu des propriétés des matériaux et des sollicitations qui lui sont imposées. Cette théorie est largement éprouvée dans le domaine de l'ingénierie. Son application aux structures végétales doit tenir compte de diverses

spécificités de ces structures. L'une des spécificités les plus notables est que la structure est vivante : sa constitution, physique et chimique, varie au cours du temps. Chez les végétaux, la manifestation la plus évidente de ce fait est la croissance. Cependant, la croissance des axes ligneux est un processus relativement lent au regard de certains types de sollicitations qui leurs sont imposées.

➤ **Cas d'un axe soumis à une sollicitation rapide**

Si la sollicitation intervient pendant une période durant laquelle la croissance est négligeable, on peut assimiler l'axe ligneux à une structure inerte. La modélisation mécanique des déformations et des contraintes générées par diverses sollicitations de ce type a été entreprise à plusieurs reprises. Une partie des modèles développés dans ce cadre s'intéressent à la réaction à des sollicitations naturelles telles que le vent (Leiser et Kemper 1973; West, Jackett et Sykes 1989) ou la neige (Mamada et al. 1984). D'autres modèles considèrent des sollicitations imposées par l'homme, telles que la mise en flexion artificielle de branches ou de troncs (Leiser et Kemper 1973; Morgan et Cannell 1987; Milne et Blackburn 1989). Ceux-ci ont été développés afin d'estimer *in vivo* les propriétés matérielles du bois. Ces modèles ont été validés par confrontation à l'expérimentation (Leiser et Kemper 1973; Morgan et Cannell 1987; Milne et Blackburn 1989).

L'application des théories mécaniques est dans ce contexte confrontée à une autre spécificité des structures végétales, qui est leur grande hétérogénéité. Contrairement à beaucoup d'objets d'étude usuels de la mécanique, un végétal n'a pas une géométrie régulière, et n'est pas constitué d'un matériau homogène. La principale difficulté dans le développement de ce type de modèle provient donc de la description de la structure et de l'hétérogénéité des propriétés mécaniques au sein de cette structure.

➤ **Cas d'un axe sollicité pendant sa croissance**

Si la sollicitation de l'axe intervient sur une durée plus longue, la croissance ne peut plus être négligée. C'est le cas, par exemple, de la mise en place des contraintes au sein d'un tronc, ou de la flexion d'un axe ligneux sous son poids propre et celui de ses productions axillaires.

La croissance du végétal se traduit à la fois par une addition de masse et par une modification de sa structure. Pour poser ce problème en termes mécaniques, il est nécessaire de tenir compte du fait que l'élaboration de la structure et les sollicitations se font simultanément, en introduisant explicitement le temps dans le problème (Fournier et al. 1991a). Le point clé de cette interaction réside dans le fait que les tissus élaborés à une date donnée ne participent au soutien que pour les chargements qui ont été imposés après cette date. La dynamique conjointe de chargement et de croissance de la structure a donc une importance particulière. La modélisation de ce phénomène a permis de prévoir le profil des contraintes de support à l'intérieur d'un tronc (Kubler 1987; Fournier 1989; Fournier et al. 1991a), et de modéliser la déformation d'une branche en croissance sous son poids propre (Castera et Morlier 1991; Fournier, Baillères et Chanson 1994).

➤ **Prise en compte des déformations longitudinales de maturation (DLM)**

Une autre spécificité des axes ligneux en croissance provient des DLM. Ces déformations, bloquées par la solidarité avec les couches de bois sous-jacentes, donnent naissance à des contraintes (dites contraintes de maturation) qui se superposent à celles imposées par autres types de chargement. La plus grande partie des ces contraintes est bloquée par la rigidité du bois en place et s'accumule dans l'axe, tandis qu'une faible part s'exprime et entraîne une déformation de l'axe. Celle-ci se traduit par un infime raccourcissement si les contraintes sont également distribuées dans la nouvelle couche, et par une flexion de l'axe si elle sont réparties de façon dissymétrique. Elles sont à l'origine d'un mécanisme de redressement actif, que nous avons évoqué en exposant le rôle du bois de réaction.

Soulignons que l'intensité de ce redressement actif ne dépend pas de la valeur moyenne des DLM dans le cerne, mais de la dissymétrie de leur distribution. Cette dissymétrie est mesurée par le « différentiel de maturation », égal à la différence entre la DLM maximale dans le cerne et la DLM du côté opposé.

La modélisation de l'effet des DLM a permis de prévoir le profil des contraintes de maturation dans un tronc d'arbre (Fournier 1989; Fournier et al. 1991b), et de modéliser le redressement d'un arbre sous l'effet des réorientations actives (Fournier et al. 1994). Leur prise en compte dans les modèles mécaniques fait face à deux difficultés. La première difficulté réside dans la formulation du problème mécanique lui-même. Dans les cas des autres sources de sollicitation évoquées jusqu'ici l'origine de la sollicitation est exogène : il s'agit de l'action de la gravité, du vent ou de l'homme. Dans le cas des DLM, l'origine de la sollicitation est un changement d'état, d'origine endogène. La prise en compte de ce type de sollicitation nécessite une formulation particulière. Fournier l'a traduite par une formulation « thermo-X-élastique » (Fournier 1989), terme général pour désigner l'effet mécanique d'un changement d'état.

La seconde difficulté est la caractérisation des sollicitations. Dans un cas concret, l'action de l'homme ou de la gravité sur un axe est en général une donnée parfaitement définie du problème. La définition de l'intensité des DLM est par contre plus problématique. La mesure des DRLM apporte une réponse à ce problème. Cependant, l'aspect destructif de la mesure et la grande hétérogénéité des valeurs mesurées dans les arbres ont invité à utiliser des modèles paramétriques de distribution des contraintes. La distribution des contraintes dans les cernes a été modélisée par une dépendance au sinus de l'angle polaire dans la section (Fournier et al. 1991b; Fournier et al. 1994), permettant de simuler une valeur de contraintes maximale d'un côté (correspondant au bois de tension) et minimale du côté opposé (correspondant au bois normal). Leur distribution longitudinale a été modélisée par des « lois de réorientation ».

➤ **Lois de réorientation**

La distribution des DLM est étroitement liée à celle du bois de tension. La distribution asymétrique du bois de tension crée un différentiel de DLM, qui est à l'origine des réorientations actives dans l'axe. La recherche d'une « loi » présidant à ces réorientations est reliée à la recherche des causes de la différenciation du bois de tension. L'objectif est d'identifier une ou plusieurs causes des réorientations, et de formuler une loi quantitative de dépendance à ces causes, dans le but de mieux comprendre la régulation de la forme. Différentes lois ont été proposées pour modéliser l'intensité du différentiel de DLM (Fournier et al. 1994) : intensité constante dès que l'inclinaison par rapport la verticale est supérieur à une valeur seuil, intensité proportionnelle à l'inclinaison, à la vitesse d'inclinaison ou combinaison de ces facteurs. La loi la plus simple a été testée, et comparée aux des observations menées en parallèle. Cette loi a permis de rendre compte quantitativement du redressement observée, mais les auteurs ont souligné la nécessité de prendre en compte une loi plus complexe (Fournier et al. 1994).

➤ **Intégration de la biomécanique dans la simulation de l'architecture**

La biomécanique a été intégrée dans certains logiciels de simulation de l'architecture, afin de simuler avec réalisme l'interaction entre la croissance et la forme des axes. Les modèles développés à partir de *L-System* (Prusinkiewicz et al. 1997) ont récemment été étendus à la prise en compte de la biomécanique (Jirasek, Prusinkiewicz et Moulia 2000). Le logiciel AMAPpara est couplé à au logiciel AMAPméca (Fourcaud et Lac 1996), qui calcule la déformation de l'arbre au cours de sa croissance. Il permet le calcul du profil de contraintes à l'intérieur du tronc. Ce logiciel tient compte des réorientations actives, et intègre des lois de réorientation (Alteyrac et al. 1999).

➤ **Place de la biomécanique dans l'architecture**

La biomécanique apparaît finalement comme une composante importante de l'architecture. La figure 6 représente les interactions entre les différentes manifestations de l'architecture, en intégrant la croissance en diamètre et les réorientations secondaires. Ces réorientations peuvent être interprétées comme une forme de tropisme liée à la croissance secondaire ; nous avons utilisé de terme de « gravitropisme secondaire » pour les désigner. De façon analogue, l'influence de la forme sur l'accroissement de diamètre est désignée par le terme de « gravimorphisme secondaire ». Les interactions relevant de la biomécanique ont été marquées en gras. Le présent travail s'est focalisé sur ces interactions.

1-3. Objectif et stratégie d'étude

La biomécanique de l'arbre a principalement été appliquée dans le contexte forestier. La convergence entre la démarche ASMA, la prise en compte croissante de la biomécanique dans les modèles de simulation de l'architecture, et l'intérêt pour l'arcure en arboriculture fruitière ont tout naturellement amené à appliquer cette discipline aux arbres fruitiers.

3.1. Etudes préliminaires

En 1995, des études préliminaires ont été effectuées sur l'abricotier. La première a consisté en un suivi de la croissance et de la déformation d'axes d'un an en croissance, sur deux variétés (Chambon 1995). Ce travail a permis de caractériser deux spécificités des fruitiers. Les branches subissent une flexion importante lors du développement des fruits, dont l'ampleur conditionne en partie le port des arbres. En outre, les fruits sont des chargements imposés aux axes de façon temporaire. On observe donc, chez les fruitiers, une phase de redressement au moment de la récolte qui n'existe pas chez les autres espèces.

Parallèlement à ce suivi, un essai d'arcure imposée a été mis en place afin d'étudier la réaction à l'arcure chez une de ces variétés (Costes, Godin et Fournier 1995b). Enfin, une étude biomécanique a été effectuée, afin d'interpréter les différences de port chez ces deux mêmes variétés (Dumonceau 1995). L'étude a impliqué la mesure des propriétés mécaniques du bois, des déformations résiduelles de maturation, l'observation et la quantification du bois de tension dans les axes. Les résultats de cette étude indiquent que la différence de quantité de bois de tension produite est susceptible d'expliquer les différences de port.

3.2. Définition des objectifs

Le travail effectué au cours de cette thèse a débuté en 1998, en suite à ces premiers résultats. Les objectifs fixés pour la thèse répondaient à une demande émergeant de l'arboriculture fruitière, et devaient permettre des avancées dans le domaine de la modélisation biomécanique.

Afin de favoriser la sélection de cultivars dont le port est adapté aux tendances actuelles, il est nécessaire de comprendre les causes des différences de port entre les variétés. La biomécanique permet de relier l'évolution de la forme des axes, et notamment l'arcure naturelle, à différents paramètres du développement. L'objectif premier de ce travail est donc de discriminer, parmi les paramètres impliqués dans la flexion des axes, les facteurs qui déterminent de façon prépondérante l'arcure. D'autre part, face à l'intégration croissante de la biomécanique dans les logiciels de simulation de l'architecture, un besoin de validation des modèles a émergé. Le second objectif de l'étude est donc de confronter aux observations les prévisions faites par le modèle.

3.3. Stratégie d'étude

➤ Choix du matériel végétal

Pour répondre au premier objectif, il est nécessaire de disposer d'un ensemble de données sur des arbres issus de différentes variétés. Les variétés d'abricotier sur lesquelles reposaient les travaux préliminaires ont été conservées pour l'étude. Une troisième variété a été ajoutée, afin de disposer d'une gamme plus étendue de ports, représentative de la diversité des ports observée chez l'abricotier. Les axes d'un an de ces variétés ont été un matériel privilégié d'étude, pour la raison suivante. Les

travaux de Fournier (94), ont montré que la forme d'un axe au cours de son développement est très sensible aux événements qui ont lieu dans les stades précoces de son développement. Chez l'abricotier, les axes ne portent des fruits qu'à partir de leur deuxième année de croissance. Les axes d'un an en croissance sont des structures de faible diamètre, qui subissent une flexion importante sous le poids des fruits. Cette flexion est ultérieurement figée par la croissance en diamètre. La flexion qui a lieu pendant la seconde année de croissance apparaît donc comme une étape clé pour l'établissement du port chez cette espèce.

➤ **Données nécessaires à l'étude**

La flexion est conditionnée par différents paramètres. D'un point de vue mécanique, la structure 'axe' est caractérisée par sa forme et son orientation, sa longueur, son diamètre et son défilement. La rigidité de cette structure dépend des propriétés mécaniques du bois. Les sollicitations imposées aux axes sont déterminées par leur charge en fruits et le poids des pousses. Enfin, les réorientations actives sont liées à l'intensité des déformations de maturation et à la distributions du bois de tension. Ces différents paramètres doivent donc être mesurés sur le matériel choisi. Afin de tenir compte de l'interaction entre la flexion et la croissance, il est nécessaire de mesurer la dynamique conjointe de chargement et d'élaboration de la structure, c'est à dire de réaliser un suivi simultané de la croissance diamétrale et du développement des productions axillaires.

➤ **Développement et validation du modèle biomécanique**

Pour réaliser la simulation de la flexion des axes, il faut disposer d'un modèle biomécanique adapté. Ce modèle doit rassembler deux conditions. Il doit être capable de simuler la flexion à partir des données disponibles sur la structure, le matériau, le chargement et les réorientations actives. D'autre part, il doit être basé sur un ensemble d'hypothèses mécaniques qui tiennent compte des spécificités du végétal mesuré (l'étude de ces différentes hypothèses est donc un préalable au choix du modèle). Compte tenu du fait que les modèles existants ne remplissaient pas ces deux conditions, le choix a été fait de développer un nouveau modèle, adapté à nos besoins.

Enfin, pour pouvoir valider le modèle biomécanique, le suivi de croissance doit être accompagné d'une mesure objective de la flexion des axes. Les sorties du modèle peuvent alors être comparées quantitativement à la réalité.

➤ **Exploitation des données pour hiérarchiser les facteurs du port**

Afin de hiérarchiser les facteurs du port, il faut pouvoir quantifier la valeur et la variabilité de chacun de ces facteurs. Nous avons choisi de réaliser cette étape par une analyse statistique des données. Cette analyse doit tenir compte de l'aspect dynamique des données mesurées. Elle doit aussi intégrer des concepts biomécaniques, pour tenir compte de l'implication relative des différents facteurs dans la flexion.

Partie II- Bases théoriques du calcul de la déformée d'un axe en croissance

Les bases mécaniques du problème de la déformation d'un axe ligneux en croissance sont présentées dans cette partie. Le premier chapitre est une présentation de la théorie des poutres, introduisant les principaux concepts de mécanique utiles pour résoudre les problèmes relatifs à la déformation de structures élancées telles que les axes ligneux. Le second chapitre s'attache à l'application de cette théorie dans le contexte d'un axe encasté, fléchissant sous l'effet de charges pondérales, en dehors de tout phénomène de croissance. On y présentera quelques résultats préliminaires et la spécification du modèle mécanique qui sera exploité dans d'autres parties de ce mémoire. Le troisième chapitre présente l'intégration à ce modèle de l'effet de la croissance radiale.

II-1. Rappel de mécanique : la théorie des poutres

La présentation de la théorie des poutres peut être trouvée dans de nombreux ouvrages de mécanique (Laroze 1980; Bamberger 1997). Cette partie a pour objet d'en exposer les bases, en précisant les différentes hypothèses sur lesquelles se fondent les calculs, ainsi que les notations utilisées. La présentation est orientée pour l'application aux axes ligneux. Précisons d'emblée qu'il n'y a pas « une » théorie des poutres, mais que la théorie appliquée pour résoudre un problème particulier consiste à faire un ensemble d'hypothèses, qui permettent de réduire la complexité réelle du problème à un ensemble d'équations. C'est pourquoi le point de vue adopté dans ce chapitre consiste à présenter une version relativement générale de la théorie des poutres, qui sera ultérieurement appliquée sous diverses hypothèses simplificatrices.

La section 1.1 est un rappel préalable sommaire de rhéologie. La section 1.2 présente la partie centrale de la théorie des poutres, qui consiste, connaissant les propriétés d'un matériau, à caractériser le comportement d'un élément de poutre. La section 1.3 pose les bases du calcul de la déformée d'un axe en port libre, idéalisé comme une poutre encastree.

1.1. Rappel de rhéologie

La rhéologie est la science du comportement des matériaux. Son objectif est de décrire la façon dont le matériau se déforme sous l'effet de sollicitations, c'est à dire sa loi de comportement.

1.1.1. Loi de comportement d'un matériau en sollicitation uniaxiale

➤ Essai de traction uniaxiale

Les principaux concepts de la rhéologie peuvent être abordés en considérant un essai de traction uniaxiale. Considérons une éprouvette parallélépipédique de longueur l et de section S , taillée dans un matériau homogène donné et enchâssée à une extrémité. Un essai de traction uniaxiale consiste à appliquer un effort de traction sur l'éprouvette, et à mesurer façon dont elle réagit. L'effort appliqué dans la direction longitudinale de l'éprouvette est caractérisé par une **force** F . Sous l'action de cette force, l'éprouvette tend à s'allonger et on peut mesurer le **déplacement** Δl de son extrémité (figure 1). Le comportement de l'éprouvette est caractérisé par la relation entre F et Δl . Afin de caractériser le comportement du matériau indépendamment des dimensions de l'éprouvette, on introduit les notions de contrainte et de déformation :

- la **contrainte**, notée σ , est le rapport entre la force appliquée et la surface de la section de l'éprouvette

$$\sigma = F / S$$

- la **déformation**, notée ε , est l'élongation relative de l'éprouvette, c'est à dire le rapport entre le déplacement de son extrémité et sa longueur initiale

$$\varepsilon = \Delta l / l$$

Le comportement du matériau est alors caractérisé par l'évolution des déformations en fonction des contraintes imposées en appliquant une force croissante. La figure 2 représente l'allure d'un diagramme contraintes / déformations dans le cas du bois. Tant que la contrainte reste inférieure à un seuil donné, le comportement du matériau est dit **élastique**, c'est à dire que la déformation est entièrement réversible, et que l'éprouvette retrouvera sa forme initiale à la suppression de la sollicitation. Dans un premier temps, les déformations sont proportionnelles aux contraintes, et le

comportement est alors qualifié d'**élastique linéaire**. Au dessus d'une certaine valeur de contraintes, les déformations ne sont plus strictement proportionnelles, et on entre dans le domaine de l'**élasticité non linéaire**.

Si on fait croître les sollicitations, on entre dans le domaine des déformations **plastiques**, c'est à dire que les déformations ne sont plus complètement réversibles : une partie des déformations sera rémanente après la suppression des sollicitations. Au delà d'un certain seuil, on atteint la limite de **rupture**, et l'éprouvette est irréversiblement endommagée.

De façon analogue, on peut mesurer le comportement du matériau par un essai de compression. Le résultat est illustré sur la même figure 2 par les valeurs négatives de déformation. On retrouve les mêmes domaines de sollicitation qu'en traction. Cependant, pour le matériau bois, les seuils de linéarité, de plasticité et de rupture ont des valeurs différentes en traction et en compression.

➤ **Caractérisation du matériau dans le domaine élastique linéaire**

Dans tout ce document, on se placera dans le cadre de l'élasticité linéaire. Ce cadre est suffisant pour cerner le comportement du bois dans les gammes de sollicitations associées au problème du port (le problème de la casse ne sera donc pas abordé). Le comportement en traction/compression d'un matériau peut alors être caractérisé par la pente de la droite contraintes/déformations. On le quantifie par le module d'élasticité, ou **module d'Young** :

$$E = \sigma / \varepsilon.$$

D'autre part, l'élongation de l'éprouvette s'accompagne d'une diminution de ses dimensions transverses. Ce phénomène est qualifié d'« **effet Poisson** ». Il est caractérisé par le coefficient de Poisson, généralement noté ν , défini comme rapport entre la déformation dans la direction longitudinale et la déformation transverse associée. A la suite de nombreux auteurs, nous négligerons cet effet dans le cadre de l'application aux axes ligneux.

➤ **Notion de visco-élasticité**

Dans ce qui précède, le paramètre « temps » a été éludé : nous avons considéré que les déformations se mettent en place instantanément après application des sollicitations. En réalité, l'accommodation géométrique en réponse à la sollicitation n'est pas strictement instantanée. Sous l'effet d'une sollicitation constante, la déformation du matériau évolue dans le temps. Ce comportement est qualifié de **visco-élastique**. Ce type de comportement ne sera pas pris en compte de façon explicite dans ce travail. Cependant, ses conséquences seront abordées et on admettra qu'il peut être pris en compte par l'intermédiaire d'une loi de variation temporelle du module d'élasticité apparent $E(t)$.

1.1.2. Loi de comportement d'un matériau en sollicitation tridimensionnelle

➤ **Notion d'orthotropie matérielle**

Dans l'exemple introduit au paragraphe précédent, nous n'avons pas considéré de direction privilégiée dans la constitution du matériau. Un matériau vérifiant de telles propriétés est dit **isotrope**. C'est le cas par exemple de l'acier, mais pas du bois. Le bois a naturellement des directions privilégiées, conséquences de son mode d'élaboration naturelle. Il est caractérisé par 3 plans de symétrie naturelle. Cette propriété est qualifiée d'**orthotropie matérielle**. Les plans de symétrie définissent le repère d'orthotropie matérielle. Ce repère est caractérisé par les trois directions L , R , T (figure 3) : L , direction « Longitudinale » correspond à la direction du fil du bois. T , direction « Tangentielle » correspond à l'orientation locale des couches dans le plan transverse. R , direction « Radiale » correspond à la direction orthogonale aux 2 autres (normale à l'orientation de la couche).

➤ **Comportement tridimensionnel**

Si on sort du contexte de la sollicitation uniaxiale, la déformation d'un cube élémentaire de bois est de façon générale caractérisée par deux types de grandeurs :

- trois termes analogues à la déformation introduite au 1.1.1, qui sont les élongations (ou contractions) relatives selon les arêtes du cube : ϵ_{LL} , ϵ_{RR} et ϵ_{TT} .
- des éventuelles variations des angles du cube, qualifiées de **cisaillements** angulaires. Ces déformations sont caractérisées par 3 demi-variations angulaires ϵ_{RT} , ϵ_{TL} , et ϵ_{LR} . On admettra que le comportement en cisaillement peut se traiter de manière analogue à celui décrit en traction.

Ces 6 composantes forment le **tenseur des déformations** :

$$\underline{\epsilon} = (\epsilon_{LL}, \epsilon_{TT}, \epsilon_{RR}, 2\epsilon_{RT}, 2\epsilon_{LR}, 2\epsilon_{LT})$$

Il permet de caractériser l'état de déformation d'un cube élémentaire de matériau. Les figures 4abc illustrent les déformations ϵ_{LL} , ϵ_{TL} , et ϵ_{LR} .

Nous admettons que l'état des contraintes au sein d'un cube élémentaire de matière est caractérisé par 6 grandeurs analogues à celles des déformations, rassemblées dans le **tenseur des contraintes** :

$$\underline{\sigma} = (\sigma_{LL}, \sigma_{TT}, \sigma_{RR}, \sigma_{RT}, \sigma_{LR}, \sigma_{LT})$$

Le lien entre contraintes et déformations, qui constitue la loi de comportement du matériau, est, dans le cas de sollicitations tridimensionnelles dans le domaine élastique linéaire, traduit par l'égalité suivante :

$$\underline{\epsilon} = \underline{S} \underline{\sigma}$$

où \underline{S} est le **tenseur des complaisances matérielles**. Cet objet mathématique caractérise la loi de comportement du matériau. On peut l'écrire sous la forme d'une matrice. Les termes diagonaux de la matrice représentent les complaisances élastiques selon les différentes modes de sollicitation. Les termes non-diagonaux sont les couplages entre modes de sollicitation. Pour des raisons physiques, cette matrice est nécessairement symétrique. Si la matrice est exprimée dans le repère d'orthotropie du matériau, les termes de couplages cisaillement/élongation sont nuls, ainsi que les termes cisaillement/cisaillement, ce qui réduit la matrice à l'expression suivante :

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix}$$

Avec les notations usuelles des ingénieurs :

- E_R : module d'élasticité radial
- E_T : module d'élasticité tangentiel
- E_L : module d'élasticité longitudinal
- ν_{ij} : coefficient de poisson dans le plan (i, j)
- G_{ij} : module de cisaillement dans le plan (i, j)

La matrice est symétrique, donc, $\nu_{TR} = \nu_{RT} E_T / E_R$, $\nu_{LR} = \nu_{RL} E_L / E_R$, $\nu_{TL} = \nu_{LT} E_T / E_L$, ce qui réduit à 9 le nombre de paramètres indépendants décrivant le comportement élastique du matériau.

1.2. Bases de la théorie des poutres

Dans la section 1.1, nous avons caractérisé le comportement d'un cube élémentaire de matériau. Pour appliquer ces lois au calcul de la déformation d'une structure sous l'effet de sollicitations, il nous faut un cadre conceptuel qui permette de réaliser le changement d'échelle entre le matériau (échelle microscopique) et la structure qui en est composée (échelle macroscopique).

1.2.1. Décomposition de la structure en théorie des poutres

Dans le cas d'un axe ligneux, caractérisé par un fort élancement, ce cadre est classiquement la théorie des poutres (Fournier 1989). La théorie des poutres fait un ensemble d'hypothèses sur la description de la structure et la façon dont elle est susceptible de se déformer. Ces hypothèses permettent de traduire la loi de comportement du matériau en une loi de comportement de la structure. La théorie des poutres se base sur une décomposition de la structure à deux niveaux :

- la poutre est décrite dans sa direction longitudinale par sa ligne directrice.
- en tout point de la ligne directrice, la poutre est décrite dans sa direction transverse par sa microstructure locale : l'élément de poutre.

Le changement d'échelle entre le comportement du matériau et le comportement de la structure se fait donc en deux temps :

- 1- passage des propriétés d'un volume élémentaire de matériau aux propriétés d'un élément de poutre.
- 2- passage du comportement d'un élément de poutre à celui d'une poutre entière.

Le premier point est traité dans les paragraphes 1.2.2 à 1.2.5. Nous aborderons le second point dans la section 1.3.

1.2.2. Champ de déformation d'un élément de poutre

Un élément de poutre est défini en une abscisse donnée par la section droite associée à cette abscisse et une portion élémentaire de la ligne directrice (c'est en fait une « tranche » de l'axe). La section est de géométrie *a priori* quelconque. Nous supposons que les caractéristiques de la section peuvent être considérées comme constantes sur la longueur élémentaire de l'élément (hypothèse de **section lentement variable**). Nous négligerons de plus l'effet des déformations transverses. Ces deux hypothèses sont classiques et très largement vérifiées dans le cadre d'une structure élancée. En outre, pour les calculs relatifs à la torsion, nous considérerons que la section ne se déforme pas, ce qui implique qu'un rayon droit reste droit au cours de la déformation.

➤ Intégrité de la section au cours des déformations

Soit un élément de poutre droit de longueur dl et de section S a priori quelconque, associé à son repère naturel (X, Y, Z) . X est la direction de la ligne directrice de l'élément, Z est une direction arbitraire choisie une fois pour toutes pour l'élément (par exemple la direction de la pesanteur au moment de sa création) et Y est la direction normale aux deux autres (figure 5). Sous l'effet de sollicitations, cet élément est susceptible de se déformer. L'hypothèse fondamentale de la théorie des poutres (**hypothèse de Navier-Bernoulli**) se traduit par la proposition suivante : « au cours de la déformation les sections restent planes et orthogonales à la ligne directrice ».

Puisque nous négligeons les déformations transverses, la déformation de l'élément peut être entièrement caractérisée par le déplacement relatif des sections les unes par rapport aux autres. Ce

déplacement peut se décomposer en une translation du centre de la section et en une rotation de la section autour de son centre.

➤ Translation de la section

La translation de la section peut se décomposer en ses trois composantes dans le repère de l'élément. Dans le cas d'une translation selon l'axe X (figure 6), qui correspond à une **déformation en traction** de l'élément, la déformation est caractérisée par l'élongation relative :

$$e = dx / dl$$

Les figures 7 et 8 représentent une translation dans chacune des directions transverses Z et Y , correspondant à des **déformations tranchantes**. On aboutit alors à une situation où les sections ne sont plus orthogonales à la ligne directrice de l'élément. Ces cas constituent une violation des hypothèses de Bernoulli, et n'entrent pas dans le cadre que nous nous sommes fixé. Les calculs incluant les efforts tranchants sur des structures élancées montrent par ailleurs que l'effet de ce mode de sollicitation est négligeable devant les autres (Fournier 1989). L'effet des sollicitations tranchantes sera donc toujours négligé.

➤ Rotation de la section

La rotation de la section dans l'espace peut se décomposer en rotations autour des axes X , Y et Z . Dans le cas d'une rotation de $d\Omega_X$ autour de l'axe X (figure 9), correspondant à une **déformation en torsion** de l'élément, la déformation est caractérisée par le taux de rotation linéique, égal à l'inverse du rayon de torsion : $C_X = d\Omega_X / dl$.

Dans le cas d'une rotation de $d\Omega_Z$ (figure 10) autour de l'axe Z , correspondant à une **déformation en flexion**, la déformation est caractérisée par le taux de rotation linéique, égal à l'inverse du rayon de courbure, et désigné par le terme de « courbure » : $C_Z = d\Omega_Z / dl$.

De façon analogue, pour une rotation de $d\Omega_Y$ autour de Y , la courbure vaut : $C_Y = d\Omega_Y / dl$.

➤ Choix des modes de déformation pris en compte

Les différents modes de déformation peuvent être rassemblés sous forme d'un vecteur (e, C_Y, C_Z, C_X) , nommé **torseur des déformations**. En pratique, les modes de déformation n'ont pas tous la même importance, et il est souvent possible de négliger un ou plusieurs de ces termes :

- dans le cadre de l'application au calcul des déformations d'un axe ligneux, les efforts prépondérants sont en général les moments de flexion. Le cadre classique est alors celui de la flexion pure, pour lequel le torseur des déformations se réduit à (C_Y, C_Z) .
- pour un axe sous charge pondérale, seuls les moments de flexion dus à la pesanteur agissent. La structure reste alors dans un même plan au cours de la déformation, et on se place dans le cadre de la flexion plane pure. Le torseur des déformations se réduit alors au seul terme (C_Y) .
- afin de tenir compte de la croissance radiale et des déformations de maturation, nous envisagerons le cas de la flexion plane / traction, pour lequel le torseur est réduit à (e, C_Y) .

1.2.3. Lien entre la structure et le matériau

➤ Orthotropie matérielle et orthotropie de structure

En tout point d'un élément, on peut définir un repère d'**orthotropie cylindrique** (r, θ, X) , dont la direction X est l'axe de l'élément, r est la direction radiale (c'est-à-dire la normale à X passant par le centre de la section) et θ la direction tangentielle, orthogonale aux deux autres. Si on considère que les

sections sont circulaires, ce repère découle directement des symétries de la structure. Il est *a priori* défini indépendamment des directions de symétrie locales du matériau.

On dit qu'il y a concordance d'orthotropie quand, en tout point d'un élément, l'une au moins des directions du repère d'orthotropie du matériau est confondue avec celle du repère d'orthotropie cylindrique. La concordance entre les repères est totale quand deux de ces directions sont confondues (ce qui implique que la troisième l'est aussi). Les figures 11abc illustrent trois cas de concordance partielle des repères : concordance dans la direction tangentielle pour une **tige conique**, concordance dans la direction radiale pour la **fibres torsé** et dans la direction longitudinale pour le cas de l'**excentricité**. Notons que sur la figure 11a la direction de L n'est pas confondue avec celle de X : en effet, les fibres de bois sont générées par le cambium qui est un tissu périphérique, et elles sont orientées parallèlement à celui-ci.

La non concordance entre les repères induit, du point de vue mécanique, des couplages entre les modes de déformation au niveau local (Fournier 1989) : par exemple, dans le cas de la fibre torsé, une sollicitation en traction de l'élément se traduit au niveau d'un cube élémentaire de matière par une élongation, mais aussi par des cisaillements. Il en résulte que le tenseur de complaisances matérielles, exprimé dans le repère d'orthotropie cylindrique, a des termes de couplages élongation/cisaillement et cisaillement/cisaillement non nuls. Nous n'envisagerons que les situations où il y a concordance pour ce qui est des directions longitudinales, comme il est classique de le faire dans le cadre de l'application de la mécanique à des structures végétales (pour plus de détails sur la résolution du problème complet voir Fournier 1989). Ces situations, où L et X sont confondus, rassemblent le cas de concordance totale des repères et celui de l'excentricité. Elles impliquent des couplages élongation/cisaillement nuls. Le cas de l'excentricité implique théoriquement des couplages cisaillement/cisaillement non nuls ; ils seront cependant négligés même quand l'excentricité sera pris en compte, afin de se ramener au cas d'une section indéformable.

➤ Réduction du tenseur des complaisances matérielles

Dans le cadre que nous nous sommes proposé, les déformations transverses et de nombreux termes de couplage ne sont pas envisagés. La loi de comportement du matériau se réduit à la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{LL} \\ 2\varepsilon_{TL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & 0 \\ 0 & 1/G_{TL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{LL} \\ \sigma_{TL} \end{bmatrix} \quad (\text{équation 1})$$

Pour alléger l'écriture, on utilisera dans la suite les notations classiques suivante :

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_{LL} & \varepsilon &= \varepsilon_{LL} & E &= E_L \\ \tau &= \sigma_{TL} & \gamma &= 2\varepsilon_{TL} & G &= G_{TL} \end{aligned}$$

La loi de comportement se traduit finalement par les égalités suivantes :

$$\begin{aligned} \sigma &= E \varepsilon \\ \tau &= G \gamma \end{aligned}$$

➤ Traduction locale des déformations d'un élément

Les conditions cinématiques sur les déformations de la structure (hypothèses de Bernoulli) conditionnent les déformations au niveau local. Considérons deux sections parallèles de l'élément (S) et (S') distantes d'une longueur dl . Considérons un point P quelconque de (S) repéré dans le plan par ses coordonnées (y,z) et un point P' de (S') repéré par les mêmes coordonnées. Cette situation est illustrée dans le plan (Y, Z) par la figure 12a. La figure 12b illustre cette même situation dans le plan

(X, Z) . Nous allons étudier le déplacement relatif des points P et P' , en premier lieu sous l'effet d'une flexion / traction, puis sous l'effet de la torsion.

Après une déformation en flexion / traction caractérisée par (e, C_Y, C_Z) , ces sections forment un angle $d\Omega_Y = C_Y dl$ dans le plan (X, Z) et un angle $d\Omega_Z = C_Z dl$ dans le plan (X, Y) et leurs centres se sont éloignées de $dx(0,0) = edl$. La figure 12c illustre cette situation dans le plan (X, Z) . On pourrait établir des schémas analogues dans le plan (X, Y) . Les sections restant planes, l'élongation subie par PP' s'exprime :

$$\Delta(PP') = dx(y, z) = dx(0, 0) + z \sin(d\Omega_Y) - y \sin(d\Omega_Z) \quad (\text{équation 2})$$

Dans le cas de **petites déformations** (hypothèse à laquelle on se conformera toujours)¹, les angles de flexion sont faibles et peuvent être assimilés à leur sinus, d'où :

$$dx(y, z) = dl(e + zC_Y - yC_Z) \quad (\text{équation 3})$$

L'élongation relative dans la direction L au niveau de P vaut :

$$\varepsilon(y, z) = \Delta(PP') / PP' = dx(y, z) / dl \quad (\text{équation 4})$$

$$\text{D'où : } \varepsilon(y, z) = e + zC_Y - yC_Z \quad (\text{équation 5})$$

Pour tous les calculs relatifs à la torsion, on considérera qu'il y a concordance totale en les repères d'orthotropie, c'est-à-dire que la rotation de la section se traduit en tout point par un cisaillement radial nul. Le fait qu'un rayon de la section reste droit au cours de la transformation implique alors :

$$\gamma(y, z) = (y^2 + z^2)^{1/2} C_X \quad (\text{équation 6})$$

1.2.4. Equilibre d'un élément sous l'action de sollicitations

Sous l'action de sollicitations, l'élément tend à se déformer. Ces déformations induisent des contraintes au sein du matériau, qui tendent à s'opposer aux forces qui leur ont donné naissance. L'élément est dit en équilibre quand la réaction du matériau (efforts intérieurs) compense entièrement les sollicitations (efforts extérieurs).

► Calcul des efforts extérieurs

Nous précisons au 1.3 la nature des sollicitations qui sont appliquées à un élément. D'ici là, nous admettons, selon le principe de Saint-Venant, que l'ensemble des sollicitations agissant sur l'élément peut se résumer par la force résultante et son point d'application. Soient $\underline{F} = (F_X, F_Y, F_Z)$ et $\underline{OG} = (G_X, G_Y, G_Z)$ les vecteurs représentant ces grandeurs, exprimées dans le repère de l'élément (voir figure 13).

Au niveau d'une section, ces efforts se traduisent par des forces de contact (N, T_Y, T_Z) , des moments (M_X, M_Y, M_Z) :

- $N = F_X$ effort normal
- $T_Y = F_Y$ effort tranchant selon Y
- $T_Z = F_Z$ effort tranchant selon Z
- M_X moment de torsion autour de X
- M_Y moment fléchissant selon Y
- M_Z moment fléchissant selon Z

Le calcul des moments s'exprime simplement à l'aide du produit vectoriel :

¹ notons que cette hypothèse ne doit pas être confondue avec l'hypothèse de petits déplacements introduite plus loin.

$$(M_x, M_y, M_z) = \underline{OG} \wedge \underline{F} \quad (\text{équation 7})$$

Le vecteur rassemblant ces six termes représente le **torseur des efforts extérieurs**. L'effet des efforts tranchants étant systématiquement négligé (cf. 1.2.2), ce torseur est réduit à (N, M_y, M_z, M_x) . Dans une formulation simplifiée du problème, certains éléments de ce torseur ne sont pas pris en compte : pour la flexion plane, le torseur se réduit à (M_y) , pour la flexion plane / traction, il se réduit à (N, M_y) .

➤ Calcul des efforts intérieurs

Les efforts intérieurs représentent la résultante au niveau d'une section des contraintes exercées par le matériau pour s'opposer à la déformation. Ces efforts se traduisent par une force résultante N^I , un moment (M_y^I, M_z^I, M_x^I) . Leur calcul est l'étape clé de la théorie des poutres, qui permet de propager la loi de comportement du matériau à l'échelle de l'élément. Il consiste à sommer en tout point $P = (y, z)$ de la section l'effort exercé par les contraintes apparues au niveau de ce point :

$$\begin{aligned} N^I &= \iint_S \sigma(y, z) dy dz & M_y^I &= \iint_S z \sigma(y, z) dy dz \\ M_z^I &= - \iint_S y \sigma(y, z) dy dz & M_x^I &= \iint_S r \tau(y, z) dy dz \end{aligned} \quad (\text{équation 8})$$

En introduisant la loi de comportement du matériau, il vient :

$$\begin{aligned} N^I &= \iint_S E(y, z) \varepsilon(y, z) dy dz & M_y^I &= \iint_S z E(y, z) \varepsilon(y, z) dy dz \\ M_z^I &= - \iint_S y E(y, z) \varepsilon(y, z) dy dz & M_x^I &= \iint_S r G(y, z) \gamma(y, z) dy dz \end{aligned} \quad (\text{équation 9})$$

Les conditions cinématiques de la théorie des poutres permettent d'exprimer les déformations locales en fonction des déformations (e, C) de l'élément, ce qui implique :

$$\begin{aligned} N^I &= \iint_S E(y, z) (e + zC_y - yC_z) dy dz & M_y^I &= \iint_S z E(y, z) (e + zC_y - yC_z) dy dz \\ M_z^I &= - \iint_S y E(y, z) (e + zC_y - yC_z) dy dz & M_x^I &= \iint_S r G(y, z) C_x dy dz \end{aligned} \quad (\text{équation 10})$$

En sortant de l'intégrale les termes du torseur des déformations, on obtient :

$$\begin{aligned} N^I &= e \iint_S E(y, z) dy dz + C_y \iint_S z E(y, z) y dy dz - C_z \iint_S y E(y, z) z dy dz \\ M_y^I &= e \iint_S z E(y, z) dy dz + C_y \iint_S z^2 E(y, z) dy dz - C_z \iint_S y z E(y, z) dy dz \\ M_z^I &= -e \iint_S y E(y, z) dy dz - C_y \iint_S y z E(y, z) dy dz + C_z \iint_S y^2 E(y, z) dy dz \\ M_x^I &= C_x \iint_S (y^2 + z^2) G(y, z) dx dy \end{aligned} \quad (\text{équation 11})$$

On voit que le **torseur des efforts intérieurs** $(N^I, M_y^I, M_z^I, M_x^I)$ s'exprime en fonction du torseur des déformations et de termes ne dépendant que de la constitution de la section.

➤ Matrice des rigidités

Ces termes sont rassemblés dans la matrice des rigidités, \underline{K} , ce qui permet d'écrire les égalités précédentes sous forme matricielle.

$$\begin{pmatrix} N^I \\ M_y^I \\ M_z^I \\ M_x^I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{21} & -K_{31} & 0 \\ K_{12} & K_{22} & -K_{32} & 0 \\ -K_{13} & -K_{23} & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e \\ C_y \\ C_z \\ C_x \end{pmatrix} \quad (\text{équation 12})$$

On note que cette matrice est symétrique : $K_{12} = K_{21}$, $K_{13} = K_{31}$, $K_{32} = K_{23}$. Chacun des termes dépend à la fois de la géométrie de la section et des propriétés du matériau en tout point de la section. Ils sont explicités ci-dessous.

$$\begin{aligned} \text{Rigidité en traction :} & \quad K_{11} = \iint_S E(y,z) dydz \\ \text{Rigidité en flexion autour de Y :} & \quad K_{22} = \iint_S z^2 E(y,z) dydz \\ \text{Rigidité en flexion autour de Z :} & \quad K_{33} = \iint_S y^2 E(y,z) dydz \\ \text{Rigidité en torsion :} & \quad K_{44} = \iint_S (y^2 + z^2) G(y,z) dydz \\ \text{Couplage traction / flexion selon Y :} & \quad K_{12} = K_{21} = \iint_S z E(y,z) dydz \\ \text{Couplage traction / flexion selon Z :} & \quad K_{13} = K_{31} = \iint_S y E(y,z) dydz \\ \text{Couplage flexion / flexion :} & \quad K_{23} = K_{32} = \iint_S yz E(y,z) dydz \end{aligned}$$

Cette matrice constitue une description suffisante de la section pour les problèmes de mécanique. Pour les problèmes mécaniques simplifiés, la sous-matrice de rigidité se déduit en supprimant les lignes et les colonnes correspondant aux modes de sollicitation négligés.

➤ Loi de comportement de l'élément

L'équilibre de l'élément n'est assuré que si les efforts intérieurs compensent entièrement les efforts extérieurs. Le torseur des déformations se calcule en fonction du torseur des efforts extérieurs et de la matrice des rigidités :

$$\begin{pmatrix} e \\ C_Y \\ C_Z \\ C_X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{21} & -K_{31} & 0 \\ K_{12} & K_{22} & -K_{32} & 0 \\ -K_{13} & -K_{23} & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} N \\ M_Y \\ M_Z \\ M_X \end{pmatrix} \quad (\text{équation 13})$$

Cette équation constitue la loi de comportement de l'élément. Elle gère le lien entre efforts et déformations à l'échelle de l'élément. Sous hypothèse de flexion / traction, elle se réduit à :

$$\begin{pmatrix} e \\ C_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{21} \\ K_{12} & K_{22} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} N \\ M_Y \end{pmatrix} \quad (\text{équation 14})$$

Sous hypothèse de flexion pure, elle se réduit à l'égalité :

$$C_Y = M_Y / K_{11} \quad (\text{équation 15})$$

1.2.5. Calcul de la matrice des rigidités

➤ Cas d'une section homogène

Considérons une section faite d'un matériau homogène de module d'élasticité longitudinal E et de module de cisaillement G . On peut alors intégrer les relations qui définissent les termes de la matrice des rigidités, et les exprimer en fonction des moments d'inertie géométrique de la section (cf. annexe 1 pour un rappel minimal sur les moments d'inertie d'un domaine du plan) :

$$K_{11} = E \iint_S dydz = ES \quad K_{12} = K_{21} = E \iint_S z dydz = EJ_Y$$

$$\begin{aligned}
 K_{22} &= E \iint_S z^2 dydz = EI_Y & K_{13} &= K_{31} = E \iint_S y dydz = EJ_Z \\
 K_{33} &= E \iint_S y^2 dydz = EI_Z & K_{23} &= K_{32} = E \iint_S yz dydz = EJ_{YZ} \\
 K_{44} &= G \iint_S (y^2 + z^2) dydz = G(I_Y + I_Z) & & \text{(équation 16)}
 \end{aligned}$$

On voit que chacun des termes de rigidité est composé d'un terme lié aux propriétés du matériau et d'un terme géométrique, qui ne dépend que de la forme et de la position de la section dans son repère. Les termes géométriques peuvent être rassemblés dans la matrice d'inertie :

$$\begin{pmatrix}
 S & J_Y & J_Z & 0 \\
 J_Y & I_Y & J_{YZ} & 0 \\
 J_Z & J_{YZ} & I_Z & 0 \\
 0 & 0 & 0 & I_Y + I_Z
 \end{pmatrix}$$

Cette matrice fournit une description de la géométrie de la section suffisante pour les problèmes de mécanique. Dans le cas de problèmes simplifiés, la matrice d'inertie est obtenue en supprimant les lignes et colonnes correspondant aux modes de sollicitation négligés.

➤ Cas d'une section composite

Dans un modèle de section composite, la section est divisée en domaines constitués d'un matériau homogène. On considère que la géométrie de chaque domaine est caractérisée par sa matrice d'inertie, exprimée dans un référentiel commun à tous les domaines de la section. Du fait des propriétés additives des moments d'inertie, la matrice d'inertie d'un domaine séparé par deux contours non sécants est égale à la différence entre les matrices d'inertie de ces contours. Si $(S^{\text{ext}}, I_Y^{\text{ext}}, \dots, J_{YZ}^{\text{ext}})$ est la matrice d'inertie du contour extérieur et $(S^{\text{int}}, I_Y^{\text{int}}, \dots, J_{YZ}^{\text{int}})$ celle du contour intérieur :

$$\begin{aligned}
 S &= S^{\text{ext}} - S^{\text{int}} & J_Y &= J_Y^{\text{ext}} - J_Y^{\text{int}} \\
 I_Y &= I_Y^{\text{ext}} - I_Y^{\text{int}} & J_Z &= J_Z^{\text{ext}} - J_Z^{\text{int}} \\
 I_Z &= I_Z^{\text{ext}} - I_Z^{\text{int}} & J_{XY} &= J_{YZ}^{\text{ext}} - J_{YZ}^{\text{int}}
 \end{aligned} \quad \text{(équation 17)}$$

Les termes de rigidité de chaque domaine s'expriment d'une façon analogue à la rigidité d'une section homogène. Considérons que chaque domaine est caractérisé par une matrice d'inertie $(S^i, J_Y^i, I_Y^i, J_Z^i, I_Z^i, J_{XY}^i)$, un module d'élasticité E_i et un module de cisaillement G_i . Les termes de rigidité de la section se calculent simplement comme la somme des rigidités de chaque domaine :

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= \sum E_i S^i & K_{12} &= \sum E_i J_Y^i \\
 K_{22} &= \sum E_i I_Y^i & K_{13} &= \sum E_i J_Z^i \\
 K_{33} &= \sum E_i I_Z^i & K_{23} &= \sum E_i J_{YZ}^i \\
 K_{44} &= \sum G_i (I_Y^i + I_Z^i) & & \text{(équation 18)}
 \end{aligned}$$

➤ Module homogénéisé d'une section composite

Il est possible d'associer à chaque mode de déformation un module homogénéisé, défini comme le module qui, pour une section homogène de même géométrie, donne la même rigidité.

$$\begin{aligned}
 \text{Module homogénéisé en traction :} & & E_{11} &= (\sum E_i S^i) / \sum S^i \\
 \text{Module homogénéisé en flexion autour de } Z : & & E_{22} &= (\sum E_i I_Y^i) / \sum I_Y^i \\
 \text{Module homogénéisé en flexion autour de } Y : & & E_{33} &= (\sum E_i I_Z^i) / \sum I_Z^i \\
 \text{Module homogénéisé en torsion :} & & G &= (\sum E_i J_{YZ}^i) / \sum J_{YZ}^i
 \end{aligned} \quad \text{(équation 19)}$$

Dans le cas général, les modules E_{11} , E_{22} , et E_{33} ont des valeurs distinctes. Dans les cas d'une distribution pas trop hétérogène des propriétés des matériaux, la différence entre ces valeurs peut être négligée, et on peut considérer la section comme une section homogène faite d'un matériau dont le module est le module homogénéisé.

➤ **Choix du repère de la section**

Il est important à ce niveau de préciser le choix du repère associé à la section. En théorie, tout repère orthonormé du plan qui contient la section convient (même un point extérieur à celle-ci), à condition que toutes les grandeurs (inerties, rigidités, efforts intérieurs, déformations de l'élément) soient exprimées dans le même repère. Plusieurs éléments sont à prendre en compte pour le choix de cette référence :

- si la référence est prise au niveau du centre géométrique de la section (centre de masse), les termes J_Y et J_Z sont nuls. C'est le choix fait usuellement pour traiter des problèmes à section homogène constante car dans ce cas les couplages flexion/traction sont alors annulés et les calculs simplifiés.
- de façon plus générale, il est toujours possible d'annuler les couplages flexion/traction en choisissant comme centre du repère le centre de flexion de la section. La position de ce centre est donnée par $y^F = K_{12}/K_{11}$, $z^F = K_{13}/K_{11}$. Pour une section hétérogène, la position de ce centre est, dans le cas général, distincte de celle du centre de masse.
- dans le cas d'un axe en croissance, la position de ce centre n'est pas *a priori* constante au cours du temps. Elle n'est constante que si la croissance est, qualitativement et quantitativement, axisymétrique.
- si l'un des axes du repère est confondu avec un axe de symétrie matérielle de la section, J_{YZ} est nul, ce qui permet de négliger les couplages flexion/flexion.
- le centre de torsion de la section n'est pas a priori confondu avec le centre de flexion, ni avec le centre de masse.
- si le repère n'est pas pris au centre de torsion, il y a un couplage entre la torsion et les sollicitations tranchantes, cas que nous avons exclu au 1.2.2.

Si on veut être aussi rigoureux que possible dans la prise en compte de la torsion tout en négligeant les déformations tranchantes, il faut placer la référence de la section au centre de torsion et envisager les couplages flexion/traction. Face à un problème de flexion/traction, il est intéressant de positionner le repère au centre de flexion, et de l'orienter selon une direction de symétrie matérielle de la section. Tous les termes de couplages sont alors annulés. Si on veut traiter le problème en flexion pure, il faut pouvoir négliger les termes de couplage flexion / traction, et il est donc indispensable de se positionner en ce centre.

Dans le cas d'un axe ligneux composite à croissance éventuellement excentrique, la position de ce centre n'est pas fixe au cours du temps. Il faut donc, à chaque étape de calcul, recalculer la position de ce centre et exprimer les rigidités en fonction de ce nouveau centre. Il paraît donc préférable de prendre une référence fixe (la moelle, par exemple), indépendante de la constitution de la section à un moment donné et fixe au cours du temps, et de toujours tenir compte des termes de couplage.

Le repère de la section est aussi celui au niveau duquel s'appliquent les déformations : les termes du torseur des déformations sont définis par rapport à ce centre.

1.3. Calcul de la déformée d'une poutre encastree

Dans le contexte de notre étude, la théorie des poutres a été introduite pour résoudre les problèmes de mécanique associés à la déformation d'un axe ligneux en port libre. Typiquement, il s'agit de prévoir la variation de la géométrie d'un axe sous l'effet d'une variation de chargement.

1.3.1. Formulation du problème

Pour poser le problème mécanique, il nous faut des informations sur la **structure** (géométrie initiale et propriétés matérielles), et des informations concernant le lien entre la structure et le monde extérieur, c'est-à-dire les **sollicitations** (efforts appliqués sur la structure, poids propre) et les **conditions aux limites** (localisation et nature des points de contact avec l'extérieur).

Dans le cas d'un axe en port libre, le seul point de contact avec l'extérieur est sa base, qui le relie à sa structure porteuse. L'axe en port libre est donc modélisé par une poutre en **appuis simple**. Cette caractéristique fait que le problème est dit **isostatique**. Dans un problème isostatique, les efforts extérieurs appliqués au niveau d'une section se calculent simplement comme les efforts appliqués par la partie « avale » de l'axe (c'est-à-dire la partie située du côté de l'extrémité libre).

De plus, nous nous limiterons au cas d'un **encastrement parfait**, c'est-à-dire que nous considérerons que l'angle de la tangente à la base de l'axe ne varie pas au cours de la transformation mécanique. Nous envisagerons cependant le cas d'une variation de l'angle à la base (indépendamment des transformations mécaniques) afin de tenir compte d'une éventuelle rotation de la structure porteuse de l'axe.

1.3.2. Principe général de la résolution du problème

Les données du problème sont la forme initiale de l'axe (ligne directrice), sa rigidité en tout point (calculée à partir des dimensions transverses et des propriétés matérielles), et les efforts appliqués à la structure. Ces efforts sont typiquement les charges pondérales imposées à l'axe et son poids propre. Ils ne sont en général pas nul dans l'état initial (à moins d'être en apesanteur !). Il nous faut donc connaître non seulement l'incrément d'efforts, mais aussi la valeur des efforts dans l'état initial.

➤ Formulation incrémentale à l'échelle de l'élément

Dans le paragraphe 1.2, nous avons calculé la déformation d'un élément de poutre sous l'effet de sollicitations. Cette formulation supposait implicitement que l'élément était initialement droit et non chargé. Nous admettons que, sous **hypothèse de faible courbure**, cette formulation se transpose directement au cas d'un élément de poutre curviligne soumis à un incrément d'effort. L'hypothèse de faible courbure est vérifiée tant que les rayons de courbure sont grands devant les dimensions caractéristiques de la section. C'est très généralement le cas pour des axes ligneux élancés.

On aboutit alors à une formulation incrémentale de la loi de comportement de l'élément de poutre tout à fait analogue à la formulation introduite précédemment : sous l'effet incrément d'effort caractérisé par un torseur de d'efforts $(\Delta N, \Delta M_Y, \Delta M_Z, \Delta M_X)$, la déformation subie par un élément donné de matrice de rigidité \underline{K} est caractérisée par le torseur de déformation :

$$\begin{pmatrix} \Delta e \\ \Delta C_Y \\ \Delta C_Z \\ \Delta C_X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{21} & -K_{31} & 0 \\ K_{12} & K_{22} & -K_{32} & 0 \\ -K_{13} & -K_{23} & K_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta M_Y \\ \Delta M_Z \\ \Delta M_X \end{pmatrix} \quad (\text{équation 20})$$

Si dl est la longueur initiale de l'élément et que (C_Y^0, C_Z^0, C_X^0) caractérisent sa courbure initiale, alors sa nouvelle longueur et ses nouvelles courbures sont donnés par :

$$\begin{aligned} dl' &= dl(1+\Delta e) & C_Z' &= C_Z^0 + \Delta C_Z \\ C_Y' &= C_Y^0 + \Delta C_Y & C_X' &= C_X^0 + \Delta C_X \end{aligned} \quad (\text{équation 21})$$

➤ Expression de l'équilibre de la structure

Calculer la déformée de l'axe, c'est déterminer sa forme à l'équilibre. On cherche donc la nouvelle géométrie de l'axe définie par sa longueur l' et ses courbures en tout abscisse s : $C_Y'(s)$, $C_Z'(s)$ et $C_X'(s)$. L'équilibre de la structure n'est assuré que si, à l'état final, les conditions d'équilibre sont vérifiées en tout point. La résolution du problème se réduit alors à la résolution du système d'équations formé par la réunion des équations qui définissent l'équilibre en chaque point.

La principale difficulté pour la résolution de ce problème provient du fait que les efforts extérieurs appliqués à un élément par sa partie avale dépendent sensiblement du bras de levier des charges, c'est-à-dire de la forme de l'axe. Ils ne peuvent donc pas être quantifiés directement, mais doivent être exprimés comme une fonction de cette forme. Or, la forme de l'axe dépend elle-même de la courbure en tout point, et donc des déformations. L'équilibre est donc géré par un système d'équations différentielles. Pour résoudre le problème, il est fait :

- soit résoudre analytiquement le système d'équations différentielles. Cette solution est envisageable pour des cas simples, mais pas dans le cas général.
- soit chercher une solution au problème par voie numérique en discrétisant en un nombre fini d'éléments.
- soit faire des hypothèses supplémentaires afin d'exprimer l'équilibre sous forme d'un système d'équation pour lequel on connaît des solutions.

Les paragraphes 1.3.3 et 1.3.4 exposent la résolution en imposant une hypothèse mécanique simplificatrice (l'hypothèse de petits déplacements) d'abord pour un cas simple, puis dans un cas plus général. La recherche de la solution exacte par voie numérique sera abordée ultérieurement (2.2).

1.3.3. Déformée d'une poutre droite en flexion pure

Soit une poutre plane cylindrique et rectiligne de longueur L , parfaitement encastée à sa base et initialement inclinée d'un angle Φ par rapport à l'horizontale (figure 14). Soit D son diamètre et E le module d'élasticité du matériau dont elle est constituée. La poutre, initialement non chargée, est soumise à une charge M à son extrémité. Nous considérerons qu'elle se déforme en flexion pure. Sa rigidité en flexion vaut : $EI(s) = \pi ED^4/64$

Sa géométrie est donnée par : $C_\theta(s) = 0$ $x(s) = s \cos\Phi$ $z(s) = s \sin\Phi$

Même dans ce cas très simple, l'expression exacte de l'équilibre de la poutre mène à une équation différentielle non triviale. Une solution à cette équation est connue dans les cas particuliers où l'angle initial Φ vaut 0 ou $\pi/2$ (Timoshenko 1966). La solution peut être approchée dans un cas général en faisant l'hypothèse de petites perturbations.

➤ Résolution sous hypothèse de petite perturbations

Si on suppose que les perturbations induites par la sollicitation sont faibles, on peut considérer que la géométrie initiale de l'axe est une bonne approximation de sa géométrie finale. Dans ce cas, on peut considérer que les moments fléchissants sont constants au cours de la déformation. Ils sont donnés en tout point par :

$$M_f(s) = gM(L-s)\cos(\Phi) \quad (\text{équation 22})$$

L'hypothèse de petites perturbations (HPP) consiste donc à négliger l'effet de la variation de bras de levier qui a lieu lors de la déformation. Elle est aussi désignée par « **hypothèse de petits déplacements** » (à ne pas confondre avec l'hypothèse de petites déformations, qui se réfère à l'échelle locale, cf. 1.2.3). La figure 15 illustre la différence entre petits et grands déplacements. La prise de courbure peut alors directement être calculée en tout point :

$$C(s) = \frac{M_f(s)}{EI(s)} = \frac{64gM(L-s)\cos(\Phi)}{\pi ED^4} \quad (\text{équation 23})$$

La variation d'inclinaison en tout point vaut alors :

$$t(s) = \frac{32gM(L^2 - (L-s)^2)\cos(\Phi)}{\pi ED^4} \quad (\text{équation 24})$$

Les coordonnées de tout point peuvent être déduits par intégration de cette expression. La flexion peut être caractérisée de façon adimensionnelle par la variation d'inclinaison de l'extrémité :

$$t(L) = \frac{32gML^2 \cos(\Phi)}{\pi ED^4} \quad (\text{équation 25})$$

➤ Autre répartition du chargement

Dans le cas où, au lieu d'être appliquée à l'extrémité, la masse est répartie de façon homogène sur la longueur de l'axe, le moment fléchissant s'exprime :

$$M_f(s) = \frac{gM(L-s)^2 \cos(\Phi)}{2L} \quad (\text{équation 26})$$

La courbure et la variation d'inclinaison en tout point valent alors :

$$C(s) = \frac{M_f(s)}{EI(s)} = \frac{32gM(L-s)^2 \cos(\Phi)}{\pi ELD^4} \quad (\text{équation 27})$$

$$t(s) = \frac{32gM(L^3 - (L-s)^3)\cos(\Phi)}{3\pi ELD^4} \quad (\text{équation 28})$$

La flexion de l'axe est caractérisée par une variation d'inclinaison de l'extrémité :

$$t(L) = \frac{32gML^2 \cos(\Phi)}{3\pi ED^4} \quad (\text{équation 29})$$

Cette formule est analogue à la l'équation 25 à un facteur près, lié à la répartition des charges. Elles peuvent être exprimées sous une forme commune faisant apparaître la signification de chaque terme :

$$t(L) = K rM \cos\Phi L^2 D^{-4} E^{-1} \quad (\text{équation 30})$$

Avec : $K = 32g/\pi$ constante de proportionnalité (indépendante des données du problème)

rM terme liée au chargement

$\cos(\Phi)$ terme lié à l'orientation initiale

$L^2 D^{-4}$ terme lié au dimensionnement de l'axe

E terme lié aux propriétés du matériau

Le terme r traduit la répartition de la charge, c'est un réel compris entre 0 (charge à la base) et 1 (charge en bout). Pour une charge uniforme, $r=1/3$. Le terme M indique la charge totale imposée à l'axe. Dans le cas où la charge est proportionnelle au volume de l'axe, on peut le décomposer en un terme m , indépendant de l'échelle et un terme LD^2 fonction des dimensions de l'axe. La variable m représente la quantité de charge pour un volume donné de la structure porteuse. Dans ce cas, la flexion est caractérisée par $t(L) = K' r m \cos\Phi L^3 D^{-2} E^{-1}$.

La formulation analytique du problème en flexion pure sous HPP dans un cas plus général (géométrie initiale, propriétés matérielles et chargement quelconques) est fournie en annexe 3.

1.3.4. Cas de données plus complexes : nécessité de discrétiser

Dans le cas de l'application à un axe ligneux réel, on est confronté à la complexité des données. En effet, dans le cadre d'application classique de la théorie des poutres (poutres, barres, charpentes...), la structure est le plus souvent de géométrie régulière et de dimension parfaitement connue, et on peut la décrire par une forme analytique simple. Pour un axe ligneux réel, la structure n'a pas *a priori* de géométrie régulière. Pour la décrire, il faut donc spécifier ses caractéristiques de façon discrète (tous les éléments ont des caractéristiques *a priori* différentes, qui ne sont pas reliées entre elles). La même technique peut être employée si l'axe est décrit par des formes analytiques qu'on ne sait pas intégrer. Le choix du pas de discrétisation conditionne le dimensionnement des éléments, qui doit respecter deux conditions :

- la variation de la section le long de cet élément doit être suffisamment faible pour pouvoir assimiler la section en tout point de l'élément à la section moyenne.
- la longueur de l'élément doit être suffisamment faible pour que les efforts extérieurs calculés en tout point de cet élément soient assimilables aux efforts moyens appliqués à l'élément.

La première condition est d'autant mieux respectée que l'axe présente une faible conicité, et que le pas de discrétisation est petit. La seconde condition est satisfaite si le pas de discrétisation est petit, et dépend aussi de la répartition des charges (en particulier, les chargements ponctuels peuvent perturber cette condition de manière importante). En tout état de cause, plus le pas de discrétisation est petit, plus ces hypothèses seront vérifiées.

Le calcul doit alors être posé sous forme discrète (les intégrales sont remplacées par des sommes). Sous HPP, ce calcul peut se faire en deux étapes (Blaise, Gril et Fournier 1992) :

- le calcul des efforts extérieurs associés à chaque élément, qui se fait efficacement en parcourant l'axe de l'apex vers la base.
- la mise à jour de la géométrie de l'axe, en parcourant l'axe de la base vers l'apex.

Le calcul sera décrit plus en détail à la section 2 de ce chapitre dans le cas de la flexion pure.

Si l'HPP n'est pas une solution valable (cas de **grands déplacements**), on s'y ramène classiquement en fractionnant la charge. On suppose alors que l'axe est chargé en plusieurs étapes, et que l'HPP est valable sur chacune de ces étapes. Cette méthode sera mise en œuvre au 2.2. Une méthode alternative de résolution numérique en grands déplacements sera présentée.

II-2. Modélisation de la flexion d'un axe sous charge pondérale

Deux modèles vont être présentés dans ce chapitre. Le premier est un outil « théorique » permettant de simuler la déformée d'un axe sous charge (2.1). Il n'est pas conçu pour être appliqué directement à des données mesurées, mais sera exploité pour valider numériquement les calculs, et étudier le phénomène des grands déplacements (2.2). Le second modèle (2.3) peut être directement exploité pour simuler la flexion à partir de données mesurées. Il sera étendu au chapitre 3 par la prise en compte de la croissance.

2.1. Modélisation à partir d'une description globale

Un premier outil numérique a été mis à point pour mettre en œuvre le calcul de la déformée d'un axe parfaitement encasté, contenu dans un plan vertical, en flexion pure sous l'effet de charges pondérales. Ce modèle très simple est implémenté sous Microsoft Excel® à l'aide de commandes Microsoft Visual Basic®. Il sera désigné par « *ModelMecal* ». La structure et son chargement sont définis à l'échelle de l'axe par des fonctions explicites de l'abscisse. Le calcul de la déformée est réalisé par voie numérique en discrétisant la structure.

L'utilisation de ce modèle permet d'expérimenter le rôle des différents paramètres définissant la structure et le chargement. Nous l'appliquerons au 2.2 pour comparer les différentes méthodes de résolution en grands déplacements. Ce modèle sera ultérieurement utilisé pour le calcul de paramètres critiques (V-1.2.3). Il donne différents résultats en sortie :

- valeur de la variation d'inclinaison de l'extrémité et de la flèche en bout
- coordonnées en tout point de l'axe déformé
- représentation graphique de la géométrie initiale de l'axe et de sa déformée
- valeur des contraintes périphériques en tout point de l'axe

2.1.1. Modèle global de description d'un axe sous charge pondérale

La structure de l'axe et son chargement sont décrits par 13 paramètres divisés en trois catégories : géométrie, rigidité et chargement.

➤ Géométrie initiale de l'axe

La géométrie de l'axe dans l'état initial est définie par un modèle à 4 paramètres. Ce modèle permet de rendre compte de nombreuses géométries réellement observées chez des axes ligneux. Le premier de ces paramètres est la longueur (L) de l'axe. Les autres paramètres définissent sa forme : inclinaison à la base (Φ), courbure à la base (C) et variation linéique de courbure à la base (c). La courbure est définie en tout abscisse par un polynôme de degré deux. Nous avons supposé que la courbure à l'extrémité libre était nulle, ce qui rend bien compte de la réalité et permet d'économiser un paramètre. La courbure est donnée en fonction de l'abscisse relative dans l'axe s , par :

$$C(s) = C + c.s - (C+c).s^2$$

L'inclinaison et la position de tout point peuvent être déduites de cette formule par intégration.

➤ Rigidité de l'axe

On suppose que l'axe est de section circulaire et homogène en tout abscisse. La rigidité de l'axe est spécifiée à l'aide de 4 paramètres :

- le diamètre moyen (D) et la conicité (K) permettent de calculer le diamètre en tout abscisse :

$$D(s) = D + K.(s-0.5)$$

- Nous avons envisagé une variation du module d'élasticité de long de l'axe. Le module d'élasticité est défini par une fonction linéaire de l'abscisse par l'élasticité à la base (E) et la variation linéique d'élasticité (e) :

$$E(s) = E + e.s$$

➤ Chargement

Le chargement est défini par 5 paramètres. On a envisagé 3 types de chargement simultanés :

- le chargement dû au poids propre de l'axe, donné par la masse volumique du bois (mv),
- un chargement réparti linéairement le long de l'axe, défini par la masse linéique de charge à la base (ML) et la variation de masse linéique (ml) :

$$ML(s) = ML + ml.s$$

- une éventuelle charge additionnelle localisée, définie par sa position (p) et sa masse (M)

2.1.2. Calcul de la déformée sous HPP

Pour les calculs, l'axe est discrétisé en 100 éléments de poutre de même longueur. L'élément i dans l'état initial est décrit par sa longueur L_i , son inertie I_i , son module d'élasticité E_i , et sa courbure C_i . La charge totale associée l'élément est désignée par m_i . Ces données sont calculées lors de la phase d'initialisation à partir des données de base introduites au paragraphe précédent.

On considère que l'axe est initialement non chargé. Il est soumis à l'ensemble des charges imposées, y compris le poids propre. La détermination de la déformée de l'axe sous HPP se décompose en deux étapes : le calcul des moments fléchissants et la mise à jour de la géométrie.

La méthode utilisée pour la résolution du problème est inspirée de Blaise et al. (1992). D'autres méthodes existent, et seront présentées à la partie VI, lors de la discussion du modèle.

➤ Calcul des moments fléchissants

Du fait qu'on considère que l'axe est initialement non chargé, les moments fléchissants sont nuls dans l'état initial. L'incrément de moment fléchissant est donc égal au moment fléchissant total.

Soit x_i la position de l'extrémité de l'élément i dans un repère extérieur (O, X, Z), pour lequel Z est la direction de la gravité. Soit x_i^{aval} la position du centre de gravité de sa partie avale et m_i^{aval} la masse de sa partie avale (figure 16). Le moment fléchissant appliqué à l'élément i vaut :

$$\Delta M_i^f = (x_i^{aval} - x_i)g m_i^{aval} \quad \text{où } g \text{ est l'accélération de pesanteur.}$$

La masse de la partie avale à l'élément $i-1$ vaut :

$$m_{i-1}^{aval} = m_i^{aval} + m_i$$

La position de son centre de gravité vaut :

$$x_{i-1}^{aval} = (m_i^{aval} x_i^{aval} + m_i x_i) / m_{i-1}^{aval}$$

L'application récurrente de ces formules en parcourant l'axe du sommet vers la base permet d'exprimer le moment fléchissant appliqué à chaque segment dans une configuration géométrique donnée.

➤ Mise à jour de la géométrie

La variation de courbure de chaque élément sous HPP est donnée par :

$$\Delta C_i = \Delta M_i^f / E_i I_i$$

La courbure de chaque élément peut alors être mise à jour à partir des courbures initiales. Les données de longueur et de courbure des éléments permettent de reconstruire la trajectoire de la ligne directrice de l'axe. Si Φ_i est l'angle du segment i , l'angle du segment $i+1$ vaut :

$$\Phi_{i+1} = \Phi_i + C_i L_i$$

La position de son extrémité est donnée par :

$$x_{i+1} = x_i + L_i \cos(\Phi_{i+1})$$

$$z_{i+1} = z_i + L_i \sin(\Phi_{i+1})$$

L'application de ces formules par récurrence de la base vers le sommet permet de calculer la position de l'extrémité de tous les segments de l'axe.

➤ Mise en œuvre des calculs

Le programme permet de choisir entre différentes options de calcul. Le calcul peut se faire soit sous HPP soit en grands déplacements. Pour le calcul en grands déplacements plusieurs techniques de résolution numérique ont été implémentées. Elles seront présentées en détail au 2.2. La méthode classique est le fractionnement de la charge. L'utilisateur précise pour cela le nombre d'étapes de fractionnement, et le calcul consiste simplement à itérer des étapes de calcul sous HPP.

2.1.3. Validation dans le cas du flambement élastique

➤ Flambement élastique d'une poutre

Le problème du flambement élastique (Timoshenko 1966) est un problème classique de mécanique, dans le détail duquel nous n'allons pas entrer. C'est un exemple typique d'invalidation de l'HPP. On considère une poutre cylindrique droite, verticale et parfaitement encastree à sa base. Cette poutre est soumise à son extrémité libre à un chargement dans la direction verticale. Tant que l'intensité de cette charge est suffisamment faible, la poutre reste parfaitement verticale et ne subit que des efforts de compression. Si on fait croître la charge, on observe qu'il existe une charge critique au delà de laquelle la poutre fléchit brutalement. C'est cette flexion brutale qui est nommée flambement élastique.

Timoshenko a exprimé analytiquement la valeur de la charge critique et l'équation qui donne la déformée exacte de l'axe, en fonction de la rigidité en flexion de la poutre EI , de sa longueur L et de la charge imposée. La charge critique P_{cr} est donnée par : $P_{cr} = \pi^2 EI / 4L^2$ (Timoshenko 1966). Cette expression analytique pour un cas particulier nous permet de valider les calculs effectués par le modèle en grands déplacements.

➤ Validation des calculs numériques

Nous avons mis en œuvre le calcul numérique de la déformée avec fractionnement de la charge avec les paramètres suivants :

$L = 1 \text{ m}$	$\Phi = 89.99^\circ$ ²	$C = 0$	$c = 0$
$D = 2 \text{ cm}$	$K = 0$	$E = 10 \text{ GPa}$	$e = 0$
$mv = 0$	$ML = 0$	$ml = 0$	$p = 1 \text{ m} \quad M = kM_{cr}$

$$\text{Avec } M_{cr} = P_{cr}/g = \pi^3 E(D/2)^4 / 16 L^2 g$$

Le tableau 1 donne, pour différentes valeurs de k , l'altitude Y de l'extrémité calculée par le modèle et celle issue des calculs de Timoshenko. On voit que la concordance est bonne, malgré une légère

² Le calcul fait avec $\Phi = 90^\circ$ mène à une flexion nulle, car c'est une position d'équilibre instable. Pour obtenir la solution d'équilibre stable, il faut imposer une perturbation élémentaire à la géométrie initiale, matérialisée par la valeur de Φ .

tendance du modèle à surestimer la flexion, due aux approximations géométriques liées à la discrétisation. La figure 17 montre l'allure des déformées.

2.2. Application au calcul en grands déplacements

Différentes méthodes existent pour trouver une solution numérique au problème en grands déplacements. Nous allons brièvement étudier deux de ces méthodes : le fractionnement de la charge et la recherche de solution exacte par approximations successives. Une amélioration sensible de la seconde méthode a été mise au point et sera présentée. Avant d'étudier brièvement ces méthodes, une représentation schématique du problème est présentée afin d'illustrer le cheminement des algorithmes.

2.2.1. Représentation schématique du problème

Soit un élément de poutre droit de rigidité EI et de longueur l , parfaitement encastré à sa base et initialement incliné d'un angle Φ_0 par rapport à la verticale. Cet élément est soumis à un poids P , appliqué avec un bras de levier L grand devant la longueur de l'élément ($L \gg l$). On suppose que cet élément se déforme uniquement en flexion plane. Cette situation est illustrée sur la figure 18. On cherche à déterminer la courbure C_f de cet élément à l'équilibre.

➤ Diagrammes courbure / moment

Nous allons représenter les différents algorithmes de recherche de l'équilibre sur des diagrammes représentant les efforts en fonction de la courbure de l'élément. En flexion pure, les efforts sont des moments fléchissants. Sur le diagramme, on peut représenter soit la courbe des efforts intérieurs, c'est à dire la réaction de l'élément à une déformation imposée, soit la courbe des efforts extérieurs, c'est à dire la sensibilité du moment de flexion à un changement de courbure, par l'intermédiaire du bras de levier.

La relation entre les efforts intérieurs et la courbure est donnée par la formule classique de la théorie des poutres en flexion ($C = M/EI$), on a donc :

$$M^I(C) = EIC$$

Graphiquement, ils sont représentés par une droite passant par l'origine, de pente EI (cf. figure 19). Les efforts extérieurs dépendent du poids et du bras de levier. Si Φ est l'angle du bras de levier par rapport à la verticale, les efforts extérieurs sont donnés par :

$$M^E = PL\sin(\Phi)$$

D'autre part, l'angle Φ est lui même lié à l'inclinaison initiale de l'élément et à sa courbure par :

$$\Phi = \Phi_0 + lC$$

On a donc :

$$M^E(C) = PL\sin(\Phi_0 + lC)$$

Graphiquement, ils sont représentés par une sinusoïde (cf. figure 20). Notons que la première intersection avec l'axe des abscisses se fait pour $C = -\Phi_0/l$, et que la pente à ce niveau vaut lPL . Pour un élément de longueur donnée, Φ_0 conditionne la position de la courbe des efforts extérieurs (figure 21) et PL son amplitude (figure 22).

➤ Détermination de l'équilibre sous HPP

Dans l'état initial, la courbure de l'élément est nulle. Le moment de flexion dans cette configuration est déterminé graphiquement par le point de la courbe des efforts extérieurs correspondant à l'abscisse 0 : $M(0)$. Dans l'état final, la courbure d'équilibre exacte C_f est déterminée par l'égalité entre les

efforts intérieurs et les efforts extérieurs. Graphiquement, elle est donnée par le point d'intersection des courbes (cf. figure 23).

Pour approcher C_f sous l'hypothèse de petits déplacements, on considère que les efforts extérieurs sont constants au cours de la déformation. On cherche alors la courbure pour laquelle les efforts intérieurs sont égaux à cette valeur, c'est à dire l'intersection entre la droite des efforts intérieurs et la droite $M(C) = M(0)$. La figure 23 illustre cette méthode. La flèche verticale correspond à l'étape de calcul des efforts extérieurs, et la flèche horizontale au calcul de la courbure C_{HPP} .

2.2.2. Différents algorithmes de recherche d'une solution numérique

➤ Fractionnement de la charge

La méthode classique pour déterminer la solution du problème consiste en un fractionnement de la charge. Le principe est de se ramener à l'HPP en considérant une série de petits incréments de charge. La figure 24 illustre cet algorithme. A chaque incrément, le calcul consiste en une étape de calcul des efforts à partir de la courbure calculée au pas précédent (flèches verticales) et une étape de calcul de la courbure (flèches horizontales). Le nombre d'étapes de calcul dépend du pas choisi pour le fractionnement (4 dans l'exemple proposé). La solution finalement obtenue est une approximation en petits déplacements sur la dernière étape de chargement.

➤ Approximations successives (Blaise et al. 1992)

Le principe de cette méthode est de considérer la solution sous HPP (sans fractionnement) comme une approximation de l'état final, et de refaire le calcul des efforts extérieurs à partir de cette configuration. Les nouveaux efforts servent alors de base à un nouveau calcul sous HPP, qui donne une nouvelle approximation de la solution. L'algorithme consiste simplement à itérer des phases de calcul des efforts et de mise à jour de la géométrie jusqu'à ce que la géométrie ne soit plus modifiée par une nouvelle étape de calcul. Il est illustré sur la figure 25. Le nombre d'étapes de calcul dépend de la précision souhaitée (c'est-à-dire du seuil de déplacement en dessous duquel on considère la géométrie constante), et la solution obtenue est asymptotiquement exacte. Sur l'exemple de la figure 25, le maximum des efforts extérieurs est situé à droite de la position d'équilibre, ce qui signifie que le bras de levier à l'équilibre a un angle par rapport à la verticale inférieure à $\pi/2$. La convergence est alors monotone. Notons que, dans le cas où le maximum des efforts extérieurs est situé à gauche de la position d'équilibre, tel que celui illustré sur la figure 26, la convergence n'est plus monotone et la solution est successivement approché par le haut et par le bas.

Notons aussi que la convergence de cet algorithme n'est pas assurée. Celle-ci dépend des données du problème. La figure 27 illustre un cas de divergence de l'algorithme. La méthode d'amortissement des efforts, présentée ci-dessous, permet de résoudre le problème dans les cas de divergence, et d'accélérer la convergence dans des cas de convergence non monotone.

➤ Approximations successives avec amortissement des efforts

L'opération consiste à n'appliquer à chaque étape de l'itération qu'une fraction de l'incrément d'efforts extérieurs. La figure 28 illustre l'effet de l'introduction d'un coefficient d'amortissement de 50% dans un cas de convergence non monotone (on a figuré en gris le chemin emprunté par l'algorithme sans amortissement, correspondant à la figure 27). On voit clairement que la convergence vers la solution est accélérée.

Figure 27: recherche de l'équilibre par la méthode des approximations successives. Cas de divergence.

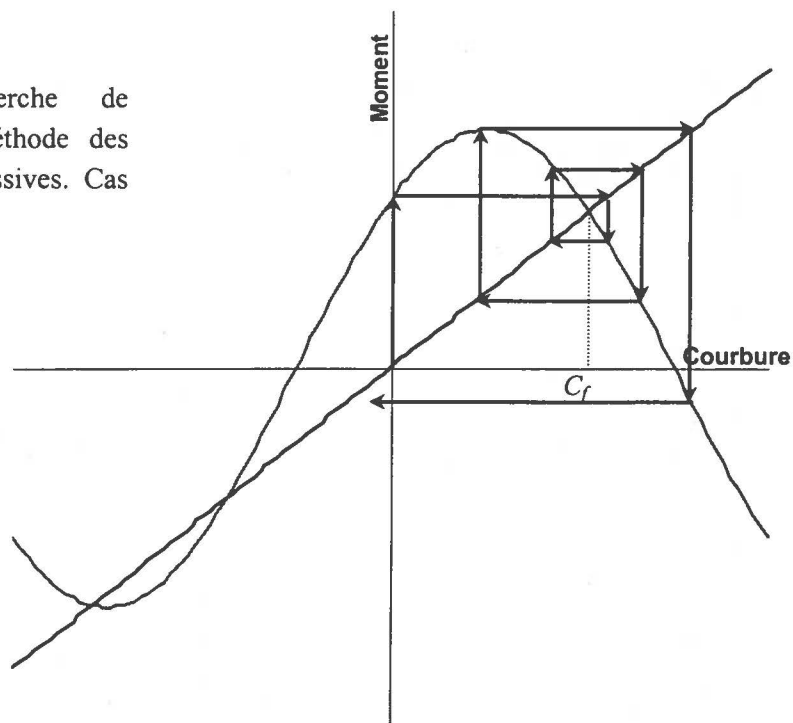
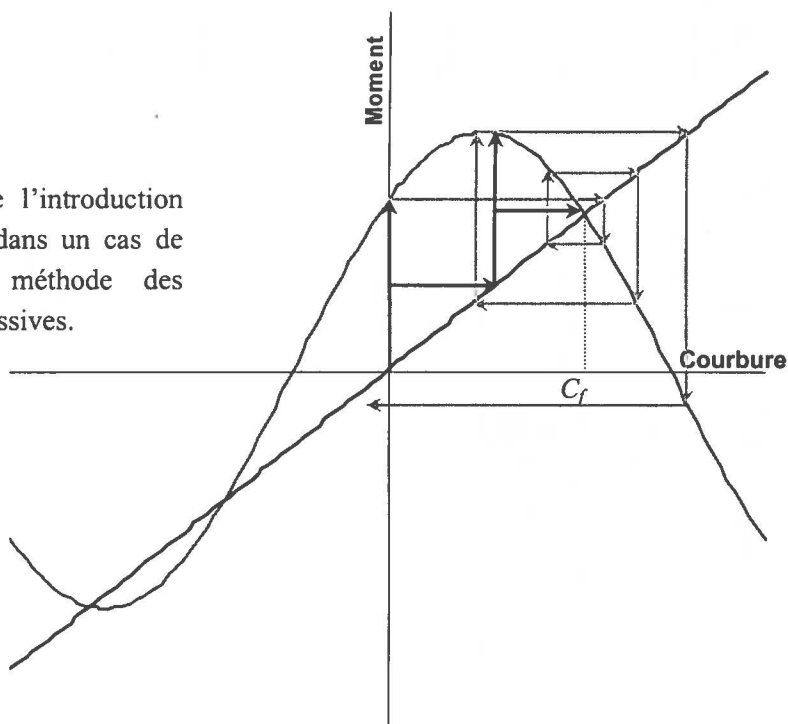


Figure 28: effet de l'introduction d'un amortissement dans un cas de divergence de la méthode des approximations successives.



2.2.3. Comparaison des méthodes de calcul

Ces trois méthodes ont été implémentées dans le modèle. L'utilisateur peut spécifier différentes options : calcul sous HPP, fractionnement de la charge (en précisant le nombre d'étapes), résolution par approximations successives (en précisant le seuil d'arrêt des itérations, et éventuellement la valeur de l'amortissement à appliquer à chaque étape).

Les différentes méthodes ont été testées et comparées avec le jeu de paramètres suivant :

$L = 1.5 \text{ m}$	$I = 90^\circ$	$C = -200 \text{ }^\circ/\text{m}$	$c = +750 \text{ }^\circ/\text{m}$
$D = 10 \text{ mm}$	$K = -5 \text{ mm/m}$	$E = 10 \text{ GPa}$	$e = -2 \text{ GPa/m}$
$mv = 100 \text{ kg/m}^3$	$ML = 100 \text{ g/m}$	$ml = 100 \text{ g/m}^2$	$p = 1,5 \text{ m} \quad M = 1 \text{ kg}$

La figure 29 illustre la forme initiale de l'axe, sa déformée sous HPP et sa déformée en grands déplacements. Une première série de calculs a été effectuée avec l'algorithme d'approximations successives. Le tableau 2 rapporte la flèche en bout calculée et le nombre d'itérations nécessaires pour un seuil d'arrêt de 10^{-3} m et 10^{-6} m . La précision désirée est atteinte au bout de 100 et 235 itérations, respectivement. L'application d'un amortissement de l'effort, même très faible, diminue de façon remarquable le nombre d'étapes de calculs. Le nombre d'étapes minimal est dans les deux cas obtenu pour une valeur de l'amortissement comprise entre 60% et 70 % : il suffit alors de 5 et 15 étapes, respectivement, pour atteindre la précision désirée.

La seconde série de calculs concerne la méthode de fractionnement de la charge. Le tableau 3 reporte les flèches obtenues avec différents nombres d'étapes de fractionnement. Pour une étape de fractionnement, on a la solution sous HPP. Il est clair que celle-ci n'est pas satisfaisante. En dessous de 10 étapes, la flèche obtenue est nettement différente de la solution exacte. On voit qu'il faut plus de 200 étapes pour atteindre une précision de 10^{-3} m .

Finalement, la méthode par approximations successives avec un amortissement semble donner le meilleur compromis précision / vitesse de calcul.

2.2.4. Quantification de l'effet des grands déplacements

La figure 29 a clairement mis en lumière la mauvaise qualité de la solution approchée en petits déplacements. La qualité de cette approximation dépend à la fois de l'orientation globale de l'axe et de l'ordre de grandeur de la déformation. Les calculs ont été réalisés sous HPP et en grands déplacements dans différents cas. On a considéré un axe initialement rectiligne, de diamètre et d'élasticité uniformes, chargé à son extrémité. Sur la figure 30, on a représenté, pour différentes valeurs de l'inclinaison initiale, le facteur de correction Γ en fonction de la variation d'inclinaison de l'extrémité obtenue sous HPP. Ce facteur est celui qui doit être appliqué à la variation d'inclinaison calculée sous HPP pour avoir la variation d'inclinaison équivalente en grands déplacements.

Les abaques permettent d'évaluer, pour un cas concret, dans quelle mesure l'HPP est justifiée. On voit en particulier que plus l'axe est proche de la verticale, plus il est nécessaire que la flexion soit petite pour justifier l'HPP. Notamment, si l'inclinaison est supérieure à 45° , il est très difficile de justifier l'HPP. La valeur de la correction peut être utilisée pour tenir compte des grands déplacements dans les formules analytiques. L'équation 30 établie au 1.3.3 s'écrit alors :

$$t_{GD}(L) = t(L) \Gamma(\Phi, t(L)) \quad \text{avec } t(L) = K r M \cos\Phi L^2 D^{-4} E^{-1}$$

La valeur de Γ peut être déterminée par interpolation à partir des abaques établies, après détermination de la flexion sous HPP $t(L)$.

2.3. Modélisation à partir d'une description locale

Un second outil numérique a été développé pour appliquer les calculs à des données mesurées localement sur un axe réel. Ce modèle, désigné par « *ModelMeca2.1* » a été implémenté sous Microsoft Excel® à l'aide de commandes Microsoft Visual Basic®. Il permet de calculer la déformée d'un axe plan en flexion pure sous charge pondérale. La structure est définie par les données à l'échelle locale, complétées par quelques paramètres globaux de l'axe. Le calcul peut se faire soit sous HPP, soit en grands déplacements. Une procédure générale d'ajustement de paramètres globaux est associée à ce modèle.

2.3.1. Description de l'axe et du chargement

L'axe est discrétisé en 50 éléments de même longueur. Les données à l'échelle locale doivent être spécifiées pour chaque élément.

➤ Géométrie

La géométrie initiale de l'axe est spécifiée par l'inclinaison de chaque élément par rapport à l'horizontale, et par la longueur totale de l'axe. Ces données permettent de calculer la longueur et la courbure des éléments. Il est possible de spécifier une variation de l'inclinaison à la base dont on tient compte dans les calculs³. En outre, il est possible de spécifier la géométrie finale mesurée de l'axe (inclinaison de chaque élément) pour comparer (visuellement ou quantitativement) la déformée simulée et la déformée réelle.

➤ Diamètre et rigidités

La morphologie de l'axe est complétée par la donnée du diamètre de chaque segment dans l'état initial. Le module d'élasticité du matériau est précisé au niveau global, et permet le calcul de la rigidité de chaque élément. Deux autres paramètres globaux permettent en outre de tenir compte d'une variation linéaire du module d'élasticité en fonction de la position dans l'axe et/ou du diamètre de l'élément.

➤ Chargement

Le chargement est spécifié par la masse des charges portées par chaque élément dans l'état initial et dans l'état final. La masse volumique du matériau est spécifiée globalement et permet le calcul du poids propre de chaque élément. On considère que les charges associées aux éléments sont localisées en leur point d'application (c'est-à-dire qu'on ne tient pas compte du bras de levier supplémentaire dans le cas de pousses longues).

2.3.2. Calcul de la déformée

➤ Hypothèses de calcul

Les calculs sont analogues à ceux présents pour *ModelMeca1*. Ils peuvent se faire sous HPP ou en grands déplacements. Différentes options peuvent être spécifiées pour les calculs, précisées par trois paramètres : le nombre d'itérations maximal, le seuil d'arrêt des itérations et le coefficient d'amortissement. En imposant à 1 le nombre maximal d'itérations avec un amortissement de 100%,

³ Ce point ne constitue pas une violation de l'hypothèse d'encastrement parfait : on considère que l'encastrement est parfait, mais que la structure sur laquelle l'axe est encastré est susceptible de rotations, indépendamment de la déformation de l'axe lui-même. Cette solution est adaptée au cas de la flexion d'un axe dont l'orientation de la structure porteuse varie au cours du temps et est mesurée.

cela correspond au calcul sous HPP. Avec un nombre d'itérations supérieur à 1, le calcul est fait en grands déplacements par approximations successives.

➤ **Choix d'un état de référence**

Le calcul consiste à déterminer la forme finale de l'axe compte tenu des données dans l'état initial et du chargement final. A la différence du calcul effectué dans *ModelMeca1*, le calcul du moment fléchissant doit tenir compte du pré-charge de l'axe. Il nous faut donc calculer la valeur initiale des moments fléchissants lors de l'étape d'initialisation. Dans une formulation incrémentale, il nous faudrait, à chaque étape de calcul, calculer le moment total et lui soustraire sa valeur initiale. Pour éviter cette opération (et pour d'autres raisons qui apparaîtront ultérieurement), nous avons choisi de formuler le problème en se référant toujours à un état de référence dans lequel les moments fléchissants sont nuls. A chaque étape de calcul, on résout donc le passage d'un état initial virtuel non chargé (dit état de référence) à l'état final. L'état de référence n'est pas l'état initial que spécifie l'utilisateur ; il doit être calculé lors de la phase d'initialisation.

➤ **Calcul des courbures de référence**

La courbure de référence d'un élément est définie comme celle qu'il adopterait en l'absence totale d'efforts extérieurs. C'est sa courbure "en apesanteur". Il est facile de la calculer quand on connaît un état d'équilibre de l'axe. Pour tout élément de l'axe de rigidité EI , soumis à un moment fléchissant total M et présentant une courbure à l'équilibre C^{eq} , la courbure de référence C^{ref} est donnée par :

$$C^{ref} = C^{eq} - M/EI$$

Notons qu'ici l'HPP n'intervient pas : même si la forme de référence est très éloignée de la forme actuelle, la valeur de C^{ref} donnée par le calcul est exacte. Ceci peut être démontré trivialement et est lié au fait qu'un état final statiquement admissible est ici connu.

2.3.3. Validation et exploitation du modèle

Les calculs en grands déplacements ont été validés par confrontation avec les solutions analytiques du flambement, comme pour *ModelMeca1*.

Le modèle permet de simuler la forme finale d'un axe compte tenu des données du problème, et de la comparer à la forme finale mesurée. Il donne différents résultats en sortie :

- valeur de l'inclinaison moyenne de l'axe et de l'inclinaison de son extrémité
- coordonnées en tout point de l'axe déformé
- représentation graphique de la géométrie initiale et la géométrie finale simulée. Eventuellement, on peut spécifier la géométrie finale mesurée, qui est représentée graphiquement et permet une appréciation visuelle de la qualité des simulations.
- la distance entre la géométrie finale mesurée et la géométrie finale simulée. Cette distance est calculée comme la moyenne des distances entre les extrémités des éléments dans chaque configuration.

Une procédure d'ajustement est associée au modèle. Elle permet, pour n'importe quel paramètre global, de déterminer la valeur qui mène à la meilleure simulation (au sens de la distance entre configuration finale mesurée et simulée). L'utilisation de cette procédure sera illustrée ultérieurement (III-3.3) pour la détermination du module d'élasticité de structure à partir des données d'un essai de flexion.

II-3. Application à la modélisation de la déformation d'un axe en croissance

Les spécificités de l'application de la théorie des poutres à un axe ligneux en croissance ont été clarifiées par Fournier (1989). Le point essentiel est que, pour être valide, la théorie appliquée doit tenir compte de la dynamique de chargement et d'élaboration de la structure. Il est donc nécessaire d'introduire explicitement le temps dans le problème, en raisonnant sur une période élémentaire de croissance.

Considérons un axe ligneux en croissance. Une étape élémentaire de croissance se manifeste par une variation des charges imposées à l'axe (croissance et/ou chute des charges axillaires) et par l'addition de nouvelles couches de bois. Les nouvelles couches se lignifient ensuite progressivement, et ont deux effets :

- elles augmentent la rigidité de la structure.
- le phénomène de maturation induit une tendance des couches à se déformer.

L'effet d'une variation de chargement a été présentée dans les chapitres 1 et 2 de cette partie. Nous allons successivement étudier l'effet de la rigidification (3.1) et celui de la maturation (3.2), en raisonnant localement au niveau d'un élément. On spécifiera ensuite un modèle tenant compte de ces phénomènes (3.3). La formulation présentée dans les deux premières sections est pour partie inspirée de (Blaise et al. 1992; Fournier et Moulia 1992). L'originalité de la formulation présentée ici est l'introduction d'une « courbure de référence » dont les avantages seront discutés au 3.2.3.

3.1. Effet de la rigidification

Nous supposons ici que l'axe est plan et se déforme en flexion pure, sous HPP. Soit un élément de poutre initialement caractérisé par sa rigidité K^0 et sa courbure C^0 .

3.1.1. Redressement incomplet d'un élément en croissance soumis à une charge temporaire

L'étape de croissance élémentaire se manifeste dans un premier temps par une variation du moment fléchissant ΔM^f , que nous supposons principalement due à l'addition d'une charge temporaire, par exemple, le développement d'un fruit (on néglige dans un premier temps l'accroissement de poids propre lié à la nouvelle couche de bois).

La flexion de l'axe sous l'effet de l'incrément moment se traduit par une variation de courbure :

$$\Delta C^f = \Delta M^f / K^0 \quad (\text{équation 31})$$

La rigidification des nouveaux tissus crée ensuite un accroissement de rigidité ΔK . Supposons que l'intégralité des charges soit supprimée après rigidification, ce qui induit un moment fléchissant de redressement :

$$\Delta M^r = -\Delta M^f \quad (\text{équation 32})$$

Le redressement de l'élément se manifeste par une variation de courbure :

$$\Delta C^r = \Delta M^r / (K_0 + \Delta K) = -\Delta M^f / (K^0 + \Delta K) \quad (\text{équation 33})$$

Après déchargement, la courbure de l'élément est donc donnée par :

$$C = C^0 + \Delta C^f + \Delta C^r$$

$$\begin{aligned}
 &= C^0 + \Delta M^f (1/K^0 - 1/(K^0 + \Delta K)) \\
 &= C^0 + \Delta M^f \Delta K / (K^0 (K^0 + \Delta K))
 \end{aligned}
 \tag{équation 34}$$

On constate qu'après déchargement total l'élément ne retrouve pas sa forme initiale. Une partie de la flexion imposée par la charge temporaire a été « figée » par la rigidification de l'élément. Ce phénomène est illustré sur la figure 31. La part « figée » peut s'exprimer en fonction du moment de flexion, de la rigidité et de son incrément :

$$\Delta C' = C' - C^0 = \Delta M^f \Delta K / (K^0 (K^0 + \Delta K)) \tag{équation 35}$$

ou, de façon équivalente, en fonction de la variation de courbure :

$$\Delta C' = \Delta C^f \Delta K / (K^0 + \Delta K) \tag{équation 36}$$

La part de flexion figée par la rigidification d'une couche est donc égale à l'incrément relatif de rigidité que crée cette couche. Dans le cas où la section a des propriétés mécaniques homogènes, on peut directement transposer en terme d'inertie :

$$\Delta C' = \Delta C^f \Delta I / (I^0 + \Delta I) \tag{équation 37}$$

La conséquence de ce fait est que l'évolution de la forme de l'axe dépend de façon sensible de la dynamique relative de flexion et de rigidification.

3.1.2. Variation de la courbure de référence d'un élément qui se rigidifie

Nous avons introduit la notion de courbure de référence dans le cadre d'un axe hors croissance. Nous allons ici montrer que, dans le cas d'une structure en croissance, il est possible et avantageux de conserver une telle formulation du problème. Celle-ci permet de résoudre la déformation d'un axe en croissance en traitant séparément le problème de la flexion sous la charge et celui de son interaction avec la rigidification. Soit M^0 la valeur initiale du moment fléchissant appliqué à l'élément. La courbure de référence de l'élément se calcule en supprimant virtuellement l'ensemble des charges. Dans l'état initial, elle vaut :

$$C_{ref}^0 = C^0 - M^0/K^0 \tag{équation 38}$$

Après addition d'un incrément de charge caractérisé par son moment ΔM^f , le moment fléchissant total appliqué à l'axe vaut :

$$M^1 = M^0 + \Delta M^f \tag{équation 39}$$

La courbure totale après flexion, calculée depuis l'état de référence, s'écrit donc :

$$C^1 = C_{ref}^0 + M^1/K^0 \tag{équation 40}$$

Après rigidification de la nouvelle couche, la courbure de référence se calcule toujours par suppression virtuelle de l'ensemble des charges. Elle vaut :

$$C_{ref}^1 = C^1 - M^1/(K^0 + \Delta K) \tag{équation 41}$$

Un jeu d'écriture permet de l'exprimer indépendamment des moments fléchissants :

$$\begin{aligned}
 C_{ref}^1 &= C_{ref}^0 + M^1/K^0 - M^1/(K^0 + \Delta K) \\
 &= C_{ref}^0 + (M^1 \Delta K / K^0) / (K^0 + \Delta K) \\
 &= (K^0 C_{ref}^0 + \Delta K C_{ref}^0 + M^1 \Delta K / K^0) / (K^0 + \Delta K) \\
 &= (K^0 C_{ref}^0 + \Delta K (C_{ref}^0 + M^1/K^0)) / (K^0 + \Delta K) \\
 &= (K^0 C_{ref}^0 + \Delta K C^1) / (K^0 + \Delta K) \\
 &= C_{ref}^0 K^0 / (K^0 + \Delta K) + C^1 \Delta K / (K^0 + \Delta K)
 \end{aligned}
 \tag{équation 42}$$

La variation de courbure de référence s'écrit donc :

$$\Delta C_{ref} = C_{ref}^1 - C_{ref}^0 = (C^1 - C_{ref}^0) \Delta K / (K^0 + \Delta K) \quad (\text{équation 43})$$

La variation de courbure de référence est donc égale à la différence entre la courbure finale et la courbure de référence, pondérée par la participation relative de la nouvelle couche à la rigidité de la section.

3.1.3. Courbure de référence de couches concentriques

Ceci nous amène naturellement à définir la notion de courbure de référence à l'échelle de la couche de bois. La courbure de référence d'une couche est définie comme la courbure qu'elle adopterait si on la désolidarisait du reste de l'élément. En l'absence de déformations de maturation elle est égale à la courbure de l'axe au moment de la lignification de cette couche. Elle décrit la géométrie de la couche au moment où elle a été élaborée.

Considérons que l'élément est divisé dans sa direction transverse en n couches homogènes et concentriques de rigidités K^1, \dots, K^n élaborées à des temps t_1, \dots, t_n au moment desquels la courbure de l'élément valait C^1, \dots, C^n . Les courbures de références des couches sont donc égales à C^1, \dots, C^n . Soit $K = \Sigma K^i$ la rigidité totale de l'élément. La forme de référence de l'élément à t_n est liée à celle de ses couches par la relation :

$$C_{ref}^n = \Sigma (C^i K^i / K) \quad (\text{équation 44})$$

(ceci se démontre trivialement en considérant les incréments successifs de courbure de référence, à partir de l'équation 43).

3.2. Effet des déformations de maturation

Le phénomène de maturation du bois se traduit par une tendance à se déformer hétérogène sur la nouvelle couche mise en place. Ces déformations étant pour partie bloquées par la rigidité de la structure, seule une fraction s'exprime. Cela se traduit en général par une traction (qui génère un raccourcissement infime de l'axe) et, si la distribution de déformations est asymétrique, par une flexion de l'axe. La façon « habituelle » de traiter le problème (Fournier et al. 1991a) est de considérer que la maturation induit des contraintes sur la couche (dites contraintes de maturation), et de calculer par intégration la résultante et le moment que ces contraintes imposent à l'axe. Le fait de définir la forme de référence à l'échelle de la couche permet de traiter le problème de façon plus naturelle, comme une variation de la courbure de référence de la couche.

Nous allons envisager le calcul dans deux cas. Le premier cas considère une couche homogène soumise à une maturation dissymétrique. Le second cas considère une couche faite d'un secteur de bois de tension et d'un secteur de bois normal. Les problèmes seront formulés en flexion pure. Dans les deux cas, on considérera que le centre d'inertie de la nouvelle couche se confond avec celui de la section originelle. Nous qualifierons ces couches de « concentriques », bien que les formulations données restent valable pour une section non circulaire.

3.2.1. Couche concentrique avec distribution plane des DLM

Soit un élément de rigidité initiale K^0 et de courbure initiale C^0 soumis à la maturation d'une couche additionnelle caractérisée par son inertie ΔI et son module d'élasticité longitudinal E . Les déformations de maturation sont définies sur la nouvelle couche par une distribution plane. En tout point (y, z) , elles valent :

$$\varepsilon^{mat}(y, z) = (\alpha^{mat}/d)z \quad (\text{équation 45})$$

où α^{mat} est la valeur différentiel de maturation (c'est à dire la différence entre la valeur des déformations de maturation dans le haut de la section et dans le bas de la section) et d la distance entre la face supérieure et la face inférieure de la section. Cette distribution des déformations de maturation correspond à une distribution en loi sinus en fonction de l'angle polaire (Blaise et al. 1992; Fournier et al. 1994). On cherche à déterminer la variation de courbure ΔC^{mat} induite par la maturation, et la courbure finale C^1 de l'élément.

➤ **Résolution par la méthode classique**

Les contraintes de maturation sont données en tout point de la nouvelle couche par :

$$\sigma^{mat}(y,z) = E\varepsilon^{mat}(y,z) = E(\alpha^{mat}/d)z \quad (\text{équation 46})$$

Le moment fléchissant résultant de la maturation vaut alors :

$$\Delta M^{mat} = \iint_{\Delta S} z\sigma(y,z)dydz = E(\alpha^{mat}/d) \iint_{\Delta S} z^2 dydz = (\alpha^{mat}/d)E\Delta I \quad (\text{équation 47})$$

On note ΔK la rigidité de la nouvelle couche : $\Delta K = E\Delta I$. Le moment fléchissant ΔM^{mat} induit sur l'élément (de rigidité $K^0 + \Delta K$) une variation de courbure donnée par :

$$\Delta C^{mat} = \Delta M^{mat} / (K^0 + \Delta K) = (\alpha^{mat}/d) \Delta K / (K^0 + \Delta K) \quad (\text{équation 48})$$

La courbure de l'élément est finalement donnée par :

$$C^1 = C^0 + \Delta C^{mat} = C^0 + (\alpha^{mat}/d) \Delta K / (K^0 + \Delta K) \quad (\text{équation 49})$$

➤ **Traduction sous forme de variation de courbure de référence**

En l'absence de maturation, la courbure de référence de la nouvelle couche serait égale à la courbure de l'élément au moment du dépôt de cette couche, c'est-à-dire C^0 . On considère que la maturation induit dans la nouvelle couche une variation de courbure de référence, égale à la variation de courbure qu'induirait la maturation si elle s'exprimait librement dans la couche. Elle est directement liée à la paramétrisation du champ de déformations de maturation, et vaut :

$$\Delta C^{mat,1} = \alpha^{mat}/d \quad (\text{équation 50})$$

La courbure de référence de la couche est alors donnée par :

$$\begin{aligned} C_{ref}^1 &= C^0 + \Delta C^{mat,1} \\ &= C^0 + \alpha^{mat}/d \end{aligned} \quad (\text{équation 51})$$

Soit M^0 le moment fléchissant total appliqué à l'élément par le poids de la partie avale avant maturation. La courbure de référence de l'élément avant le dépôt de la couche est donnée par :

$$C_{ref}^0 = C^0 - M^0/K^0 \quad (\text{équation 52})$$

L'équation 44 nous permet de calculer la nouvelle courbure de référence C_{ref}^1 de l'élément en fonction de la courbure de référence de la nouvelle couche et des participations relatives à la rigidité :

$$\begin{aligned} C_{ref}^1 &= C_{ref}^0 K^0 / (K^0 + \Delta K) + C_{ref}^1 \Delta K / (K^0 + \Delta K) \\ &= (C_{ref}^0 K^0 + C_{ref}^1 \Delta K) / (K^0 + \Delta K) \end{aligned} \quad (\text{équation 53})$$

La forme finale après maturation est alors simplement obtenue en appliquant les moments fléchissants initiaux à partir de la nouvelle forme de référence :

$$\begin{aligned} C^1 &= C_{ref}^1 + M^0 / (K^0 + \Delta K) \\ &= (C_{ref}^0 K^0 + C_{ref}^1 \Delta K + M^0) / (K^0 + \Delta K) \end{aligned} \quad (\text{équation 54})$$

On vérifie qu'elle est bien égale à celle calculée par la méthode classique :

$$C^1 = ((C^0 - M^0/K^0)K^0 + (C^0 + \alpha^{mat}/d) \Delta K + M^0) / (K^0 + \Delta K)$$

$$\begin{aligned}
 &= C^0 + \Delta C^{mat}, \Delta K / (K^0 + \Delta K) \\
 &= C^0 + (\alpha^{mat}/d) \Delta K / (K^0 + \Delta K)
 \end{aligned}
 \tag{équation 55}$$

La variation de courbure induite par la maturation sur l'élément s'exprime simplement à partir de la variation de courbure de référence de la nouvelle couche et de sa participation relative à la rigidité :

$$\Delta C^{mat} = \Delta C^{mat}, \Delta K / (K^0 + \Delta K)
 \tag{équation 56}$$

3.2.2. Couche concentrique avec zone de bois de tension

Soit un élément de rigidité initiale K_0 et de courbure initiale C_0 soumis à la maturation d'une couche additionnelle caractérisée par son inertie ΔI . On suppose que cette couche est faite de deux types de tissus : le bois normal (BN) et le bois de tension (BT). La distribution de ces tissus est caractérisée par leurs moments d'inertie d'ordre 1 et 2 : $J^{BN}, J^{BT}, I^{BN}, I^{BT}$, avec $I^{BN} + I^{BT} = \Delta I$. Soient E^{BN} et E^{BT} les modules d'élasticité des deux tissus. Les déformations de maturation qui ont lieu dans la couche dépendent du type de tissus : ils valent α^{BN} dans la zone de bois normal et α^{BT} dans la zone de bois de tension. Nous négligerons le déplacement de l'axe neutre de la section causé par l'hétérogénéité matérielle de la nouvelle couche.

➤ Résolution par la méthode classique

Les contraintes de maturation sur la nouvelle couche valent :

$$\begin{aligned}
 \sigma^{BN} &= E^{BN} \alpha^{BN} \quad \text{sur la zone de bois normal.} \\
 \sigma^{BT} &= E^{BT} \alpha^{BT} \quad \text{sur la zone de bois de tension.}
 \end{aligned}$$

Le moment fléchissant résultant de la maturation vaut alors :

$$\begin{aligned}
 \Delta M^{mat} &= \iint_{\Delta S} z \sigma(x, y) dy dz = \iint_{BN} z \sigma^{BN} dy dz + \iint_{BT} z \sigma^{BT} dy dz \\
 &= E^{BN} \alpha^{BN} \iint_{BN} z dy dz + E^{BT} \alpha^{BT} \iint_{BT} z dy dz \\
 &= E^{BN} \alpha^{BN} J^{BN} + E^{BT} \alpha^{BT} J^{BT}
 \end{aligned}
 \tag{équation 57}$$

La nouvelle couche étant concentrique, on a nécessairement $J^{BN} + J^{BT} = 0$. Le moment résultant de la maturation s'écrit donc :

$$\Delta M^{mat} = (E^{BT} \alpha^{BT} - E^{BN} \alpha^{BN}) J^{BT}
 \tag{équation 58}$$

Soit ΔK la rigidité de la nouvelle couche : $\Delta K = E^{BN} I^{BN} + E^{BT} I^{BT}$. La variation de courbure de l'élément induite par la maturation vaut :

$$\begin{aligned}
 \Delta C^{mat} &= \Delta M^{mat} / (K^0 + \Delta K) \\
 \Delta C^{mat} &= (E^{BT} \alpha^{BT} - E^{BN} \alpha^{BN}) J^{BT} / (K^0 + \Delta K)
 \end{aligned}
 \tag{équation 59}$$

➤ Traduction sous forme de variation de courbure de référence

La variation de courbure de référence de la nouvelle couche se calcule simplement en isolant mentalement cette couche, et en quantifiant la variation de courbure induite par la maturation :

$$\Delta C^{mat}, = \Delta M^{mat} / \Delta K = (E^{BT} \alpha^{BT} - E^{BN} \alpha^{BN}) J^{BT} / \Delta K
 \tag{équation 60}$$

La variation de courbure de l'élément se calcule alors en pondérant par la participation relative à la rigidité :

$$\Delta C^{mat} = \Delta C^{mat}, \Delta K / (K^0 + \Delta K)
 \tag{équation 61}$$

On vérifie aisément que cette expression est égale à celle obtenue par la méthode classique (éq. 59).

➤ **Cas d'une couche circulaire avec un secteur de bois de tension**

Considérons le cas simplifié d'une section circulaire de rayon R qui croît par addition d'une nouvelle couche d'épaisseur ΔR , dont le module d'élasticité est homogène et donné par E . Supposons que cette couche comporte un secteur de bois de tension d'extension Φ , situé dans le haut de la section, et caractérisé par une déformation de maturation α (fig. 32). On suppose que les déformations de maturation du bois normal sont négligeables.

Le moment des forces induit par la maturation est donné par :

$$\Delta M = \iint_S y \sigma(r, \theta) r dr d\theta \quad (\text{équation 62})$$

avec $y = r \cos \theta$ et $\sigma(r, \theta) = E \alpha(r, \theta)$, d'où

$$\Delta M = \iint_S r^2 \sin(\theta) \alpha(r, \theta) dr d\theta = \alpha \int_R^{R+\Delta R} r^2 dr \int_{\pi/2-\Phi/2}^{\pi/2+\Phi/2} \sin(\theta) d\theta \quad (\text{équation 63})$$

En intégrant cette expression, on obtient :

$$\Delta M = 2E\alpha R^2 \Delta R \sin(\Phi/2) \quad (\text{équation 64})$$

La variation de courbure de l'élément est finalement donnée par

$$\Delta C = \frac{\Delta M}{EI} = \frac{4\Delta M}{E\pi(R+\Delta R)^4} = \frac{8\alpha\Delta R \sin(\Phi/2)}{\pi(R+\Delta R)^2} \quad (\text{équation 65})$$

3.2.3. Avantages et extension de la méthode de la forme de référence

L'introduction de la forme de référence, réalisée ici à la suite de Moulia (1993), présente l'avantage de séparer clairement les processus de déformation endogènes (effet de la lignification et de la maturation) et l'influence de facteurs externes (chargement pondéral ou autre). Elle a ici été illustrée dans le contexte de la flexion pure en définissant la forme de référence à l'échelle de l'élément et de la couche concentrique.

Dans le cadre d'une spécification plus générale du modèle mécanique cette méthode a été généralisée au cas d'une section composite quelconque sollicitée en flexion3D/traction/torsion. La forme de référence est alors définie à l'échelle d'un domaine quelconque de la section (couche excentrée ou zone quelconque de bois de tension). La formulation reste analogue à celle présentée ici, mais les grandeurs scalaires deviennent vectorielles (sollicitations et déformations) ou matricielles (inertie et rigidité). Cette formulation m'est apparue très avantageuse car elle permet de gérer automatiquement les déformations endogènes telles que la maturation, et les couplages entre modes de sollicitation. Les déformations de maturation y sont définies de façon naturelle à l'échelle d'une zone quelconque de la section comme une traction pure, qui, compte tenu du fait que la zone n'est pas centrée, se traduit par une flexion/traction à l'échelle de l'élément. L'avantage est notamment que le problème des déformations de maturation est résolu à partir de seules notions cinématiques. La notion de « contrainte de maturation », qui est relativement contre-intuitive, n'apparaît plus alors de façon explicite : chaque zone de la section est traitée indépendamment comme si elle se déformait librement, puis « assemblée » pour former la section, et tenant compte de sa rigidité relative et de sa position dans la section. Un autre avantage est que le problème s'exprime formellement de façon identique quels que soient les modes de sollicitation pris en compte (seuls changent la dimension des objets mathématiques qui interviennent : vecteur-forme, tenseur d'efforts et matrices de rigidité ou d'inertie).

La spécification détaillée de cette méthode et son équivalence avec la méthode classique n'a pas pu, faute de temps, être complètement présentée dans ce mémoire.

3.3. Modélisation de la déformation d'un axe en croissance

Le modèle de déformation d'un axe en croissance a été développé à partir de *ModelMeca2.1*. Il fonctionne à partir de données locales et de quelques paramètres globaux. Ce modèle sera désigné par *ModelMeca2.2*.

3.3.1. Spécification des données de croissance

La croissance se fait en un nombre d'étapes qui n'est pas limité *a priori*. Pour chaque étape, et pour chaque élément, il est nécessaire de fournir :

- le diamètre de l'élément.
- la masse de charges associée à l'élément.

On peut de plus imposer à chaque date la valeur de l'inclinaison à la base de l'axe, afin de tenir compte de la flexion de la structure porteuse de l'axe (qui ne peut être simulée). Il est en outre possible de spécifier la géométrie réelle à chaque date, afin de la comparer visuellement et quantitativement à la géométrie simulée.

La croissance radiale est supposée concentrique, et les incréments de diamètre sont directement calculés à partir des données. On suppose que la croissance des axillaires se manifeste par un accroissement des charges ponctuelles associées à chaque élément (les bras de levier des pousses longues sont négligés).

Les données sont rassemblées sous forme de tableaux Excel. Il est possible de stocker les données relatives à la croissance d'un axe dans un fichier de données (au format Excel). Une procédure permet l'importation rapide de ces données.

3.3.2. Spécification des paramètres de maturation

Le délai qui sépare le dépôt des couches de leur lignification (dit 'délais de lignification') est précisé au niveau global. Les déformations de maturation sont gérées par un modèle de déformations planes sur la nouvelle couche (cf. 3.2.1). Il est possible de préciser le différentiel de maturation pour chaque segment et à chaque date si on dispose de ces données. Dans le cas contraire, le modèle se base sur des "lois de réorientations" paramétrées au niveau global. La loi de réorientation la plus simple est un différentiel de maturation constant dans le temps et le long de l'axe. Des dépendances à une ou plusieurs covariables (telles que la distance à l'apex, l'inclinaison locale en début de période ou la variation d'inclinaison depuis la période précédente) peuvent être prises en compte. Il est de plus possible de préciser une valeur maximale de ce différentiel.

3.3.3. Déroulement des calculs

Le calcul consiste à alterner des étapes de croissance/maturation et des étapes de calcul mécanique. A chaque étape de croissance/maturation, 4 opérations sont effectuées :

- les données de chargement sont mises à jour.
- le diamètre et la rigidité sont mis à jour. On tient compte du délais de lignification en décalant la croissance diamétrale de l'axe du nombre de périodes précisé par l'utilisateur.
- le différentiel de déformations de maturation de chaque segment est calculé à partir des paramètres des lois de réorientations.

- ce différentiel permet le calcul de la forme de référence de la nouvelle couche par l'équation (3-1), en supposant que la distribution des déformations de maturation est plane et que le module d'élasticité est homogène sur la couche. La courbure de référence du segment est alors mise à jour grâce à l'équation (3-2).

Les calculs mécaniques sont analogues à ceux de *ModelMeca2.1*, mais le nouvel état d'équilibre de l'axe est déterminé, à chaque étape, et se référant à la nouvelle courbure de référence.

Partie III- Mesure des phénomènes impliqués dans la croissance et la flexion des axes d'abricotier de un an

Les concepts et les modèles présentés dans la partie II vont être mis en œuvre pour discriminer les facteurs responsables de la flexion chez trois variétés d'abricotier. Le matériel de base de l'étude et les mesures impliquées sont présentés dans cette partie. Les mesures impliquent le suivi de la croissance et de la flexion d'un échantillon d'axes, la caractérisation mécanique des matériaux constitutifs, l'évaluation des déformations de maturation et l'étude anatomique du bois de tension.

III-1. Matériel végétal de l'étude

L'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit a impliqué de nombreuses mesures. Toutes les mesures ont été réalisées sur des organes aériens provenant des mêmes arbres de trois variétés d'abricotier. Les variétés et les arbres impliqués dans le présent travail sont présentés dans les sections 1.1 et 1.2. L'échantillon d'axes d'un an présenté au 1.3 constitue le matériel de base de l'étude. Ce matériel est complété par plusieurs échantillons complémentaires, présentés au 1.4.

1.1. Les variétés étudiées

Les variétés étudiées ont été choisies pour la diversité de leurs ports. Compte tenu de l'objectif de l'étude, l'importance économique des variétés n'a pas constitué un critère de choix. L'étude de caractères biomécaniques des branches et l'étude de la réaction à l'arcure ont été réalisés au laboratoire en 1995 sur les variétés 'Lambertin n°1' et 'Modesto'. Nous avons conservé le choix de ces variétés pour notre étude afin de bénéficier pleinement des résultats établis lors de ces travaux. Nous avons ajouté la variété 'Palsteyn', afin d'avoir une gamme de ports plus étendue. Les fiches descriptives des variétés étudiées peuvent être trouvées dans Lichou et Audubert (1989). Nous n'en présentons ici que les caractères principaux.

➤ Lambertin n°1 (fig. 0-a)

La variété 'Lambertin n°1' (ultérieurement désignée par 'Lambertin') est d'origine californienne. Elle est cultivée en France en zone méridionale. Ses qualités gustatives et sa précocité en font une variété économiquement intéressante, bien que relativement peu répandue. 'Lambertin' est une variété vigoureuse. Son port est qualifié de dressé ou d'érigé. Sa ramification donne peu de pousses longues et de nombreuses pousses courtes. Les fruits sont essentiellement situés sur les pousses courtes.

➤ Modesto (fig. 0-b)

Cette variété est elle aussi d'origine californienne. Elle a une large zone d'adaptation en France. Elle présente de bonnes caractéristiques d'ensemble, mais une qualité gustative moyenne limite son intérêt économique. Elle a un port initialement dressé qui a tendance à s'ouvrir sous la charge en fruits. Les fruits sont situés sur les pousses courtes et sur les pousses longues.

➤ Palsteyn (fig. 0-c)

'Palsteyn' est une variété d'origine sud africaine. C'est essentiellement une variété expérimentale, et son intérêt économique est faible. Elle a un port très particulier, inhabituel pour l'abricotier, qualifié de pleureur. Ce terme n'est peut être pas tout à fait adéquate, car laisse imaginer que les rameaux sont pendants (comme ceux d'un saule pleureur). En réalité, tous les axes ligneux de cette variété sont des structures rigides qui n'ont rien à voir avec le type pleureur tel qu'on peut l'imaginer. Cependant certains axes sont inclinés sous l'horizontale, et fléchissent intensément sous le poids des fruits, ce qui donne à l'arbre une allure franchement affaissée. Nous qualifierons ce port de "retombant". Les fruits sont situés sur les pousses courtes et sur les pousses longues.

1.2. Origine du matériel expérimental

➤ Le verger

Toutes les observations ont été faites sur du matériel provenant du verger expérimental du laboratoire d'arboriculture fruitière de l'INRA de Montpellier. Ce verger est situé sur le domaine expérimental de

Melgueil (commune de Mauguio), à une vingtaine de kilomètres au sud-est de Montpellier. Le climat de cette région est méditerranéen, caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Le matériel provient d'une parcelle d'1.7 ha plantée en 1993, sur laquelle de nombreuses variétés d'abricotier sont représentées. Toutes les variétés du verger sont greffées sur porte-greffe 'Manicot'. Les distances de plantation sont de 6 m entre les rangs et 4 m entre les arbres d'un rang, ce qui permet une croissance quasiment libre des arbres, sans gêne mutuelle.

➤ Les arbres

Le matériel étudié provient de 6 arbres de 'Lambertin', de 8 arbres de 'Modesto' et de 4 arbres de 'Palsteyn'. Les arbres étaient dans leur 7^{ième} année de croissance à la période où les observations ont été faites. Les arbres de 'Lambertin' et 'Modesto' ont été conduits en « Y » et ont donné lieu à des études antérieures (Chambon 1995; Dumonceau 1995). Les arbres de 'Palsteyn' ont été conduits en gobelet à 4 charpentières. Ils ont subi une légère taille d'entretien tout au long de leur croissance. Début 1998, les arbres étaient sains et bien développés et atteignaient environ 4 mètres de haut. A ce stade, les arbres produisent des pousses annuelles de plus en plus courtes s'ils ne sont pas taillés. Une taille sévère a été pratiquée en janvier 1998 afin d'induire le développement de pousses longues, qui constituent le matériel de base de notre étude. Ces pousses se sont développées durant l'année 1998 et ont été étudiées pendant leur deuxième année de développement, en 1999. Les arbres ont été laissés en développement libre durant toute la saison 1999. Les seules interventions qu'ils ont subies sont un léger éclaircissage pratiqué tôt dans la saison, afin d'éviter au maximum les chutes de fruits en cours de suivi, et des prélèvements de matériel pour les mesures complémentaires. Ces prélèvements, qui sont détaillés au 1.4, représentent un volume très faible par rapport à celui des arbres (nous en négligerons donc l'impact sur le développement des axes suivis).

1.3. Echantillon principal

➤ Echantillonnage des axes

L'échantillon principal a été constitué pendant l'hiver 1998/1999. Par souci d'homogénéité du matériel, nous avons choisi uniquement des axes longs monocycliques (c'est à dire constitués d'une seule unité de croissance) et nous avons éliminé tous ceux qui portaient des rameaux anticipés. Quarante axes par variété ont été sélectionnés en fonction de plusieurs critères :

- dimensions : des axes de longueurs et de diamètres variés ont été choisis
- courbure et orientation : l'échantillon a été choisi pour être représentatif de la diversité de courbures et d'orientations initiales de la population d'axes d'un an présents sur les arbres.
- position architecturale : l'échantillon n'est pas représentatif de la population d'axes du point de vue de leur position architecturale. En effet, on a évité de sélectionner les rameaux peu accessibles (en particulier ceux situés en hauteur) et ceux portés par des structures de petits diamètres. Les axes sélectionnés étaient situés sur des branches charpentières. La distance entre la base de ces axes et le sol est comprise entre 75 cm et 2 m.

Les axes choisis ont été étiquetés et numérotés. Ils seront désignés par une lettre codant pour la variété suivie de deux chiffres identifiant l'individu (le code « M19 » désigne l'axe n°19 de la variété 'Modesto'). Quatre axes de la variété 'Palsteyn' ont été accidentellement perdus après échantillonnage, ce qui réduit à 36 l'effectif de l'échantillon pour cette variété.

L'échantillon a été l'objet d'un suivi de croissance et flexion pendant la saison 1999 (détaillé à la section 2 de cette partie). En fin d'année, ils ont été l'objet de mesures *in situ* de déformations de

maturation (détaillées à la section 4). Le prélèvement de tous les axes a été effectué entre la dernière semaine de novembre et la première semaine de décembre. Avant prélèvement, on a noté l'orientation des axes par rapport à la gravité avec un trait de Typex en face supérieure. Les axes ont été conservés humides dans des sacs plastiques dans une chambre froide à 5° pour l'étude des propriétés mécaniques réalisée en Décembre 1999 (détaillée à la section 3). A la fin de l'hiver, ils ont été débités en tronçons et conservés dans l'alcool à 70° en vue de l'étude anatomique (détaillée à la section 5).

➤ **Sous échantillon de validation**

Au sein de cet échantillon, qualifié d'échantillon principal, nous avons choisi un sous échantillon de 5 axes par variété qualifié d'échantillon de validation. Cet échantillon est destiné à établir une validation des modèles mécaniques ; il a été l'objet de mesures plus précises et plus fréquentes. Plusieurs critères ont présidé au choix de ces axes : adéquation aux hypothèses du modèle mécanique (axe situé dans un plan vertical, bien encastré sur une structure porteuse de gros diamètre), accessibilité et vigueur de l'axe. L'échantillon est constitué des individus L23, L30, L32, L33, L38, M19, M20, M22, M23, M24, P30, P31, P37, P39 et P40.

1.4. Matériel utilisé pour les mesures complémentaires

D'autres organes aériens ont été prélevés sur les mêmes arbres pendant l'année du suivi de l'échantillon principal, afin de réaliser des mesures complémentaires. On en présente ici simplement la liste ; les dates de prélèvement et les mesures seront détaillées dans la suite de ce chapitre.

➤ **Etablissement de lois d'allométrie**

Afin d'évaluer la masse des organes portés par les axes, des lois d'allométrie ont été établies entre leur dimension et leur masse. Ces lois ont été établies à partir des pousses portées par 15 axes de chaque variété (équivalents à ceux de l'échantillon principal) et de 170 fruits par variété.

➤ **Mesure des propriétés mécaniques**

Les mesures de propriétés mécaniques du bois d'abricotier ont été réalisées essentiellement à partir du matériel de l'échantillon principal. Fin 1999, on a prélevé en plus 3 axes longs de l'année par variété, afin de disposer de matériel âgé d'un an. Trois autres axes longs de l'année par variété ont été utilisés pendant l'hiver 1999/2000 pour les essais de fluage, mais n'ont pas été prélevés.

➤ **Mesure de déformations de maturation**

Les mesures de déformations de maturation ont été pratiquées sur une partie des axes de l'échantillon principal fin 1999. De plus, pour chaque variété, 3 axes équivalents à ceux de l'échantillon (âgés de deux ans) et deux charpentières âgées de 3 à 5 ans ont été utilisés à cet effet puis prélevés.

➤ **Essai d'arcure sur 'Modesto'**

En 1995, une étude a été mise en place sur les axes d'un an de la variété 'Modesto'. Cette étude était destinée à mesurer la réaction à l'arcure. Le protocole détaillé peut être trouvé dans Costes et al. (1995b). Durant l'hiver, trois lots de 40 axes longs de un an ont été sélectionnés et soumis à différents traitements : le premier lot (« forte charge ») a été soumis à un poids de 840 g attaché aux deux tiers de l'axe, puis maintenu en position fléchie pendant toute la saison de croissance ; le second lot (« faible charge ») a subi un traitement analogue avec un poids de 530 g ; le troisième lot (« témoin ») a été laissé en développement libre. La géométrie 3D des axes a été relevée par triangulation (méthode « des trois piquets », un point tous les 10 cm) avant imposition de la charge, et après imposition de la charge.

Début 1998, une partie de ces axes subsistaient et ont été mis à profit pour l'étude anatomique. Les axes restants (8 « forte charge », 5 « faible charge » et 14 « témoins ») étaient alors âgés de 4 ans. Ils ont été prélevés début 1998, au moment de la taille de relance des arbres. Ils ont ensuite été débités en tronçons et conservés au sec.

III-2. Suivi de croissance/flexion sur l'échantillon principal

2.1. Objectifs et calendrier du suivi

2.1.1. Objectifs

Le suivi mis en place sur l'échantillon principal répond à trois objectifs :

- caractériser les variétés du point de vue de leur morphologie, de leur dynamique de croissance et de l'évolution de leur forme.
- fournir les données de base pour valider les modèles mécaniques de flexion.
- caractériser les variétés d'un point de vue biomécanique, dans le but d'identifier les facteurs prépondérants qui expliquent les différences de port.

La croissance des axes d'un an d'abricotier se manifeste par le développement de leurs productions axillaires (pousses et fruits) et une augmentation du diamètre des axes ; leur forme et leur orientation varient de façon concomitante. D'un point de vue mécanique, le développement des axillaires se traduit par une modification du chargement, l'augmentation de diamètre se traduit par une modification de la structure porteuse, et les variations de forme et d'orientation par une déformation de l'axe. Afin de désigner clairement ces trois aspects du développement de l'axe, on utilisera les termes suivants :

- la « **morphologie** » désigne le dimensionnement de l'axe (longueur, diamètre), indépendamment de sa position, de son orientation et de sa forme dans l'espace.
- le « **chargement** » désigne l'ensemble des masses portées par la structure, c'est à dire les pousses axillaires et les fruits. En l'absence d'autres précisions, ce terme exclut le poids propre de l'axe⁴.
- la « **géométrie** » d'un axe désigne la trajectoire dans l'espace de sa ligne directrice (c'est à dire l'orientation de ses différentes parties).

2.1.2. Calendrier

Les 120 axes de l'échantillon principal ont été l'objet de trois types de relevés tout au long de la saison : digitalisations, mesures de diamètres et notations sur les axillaires. Pour des raisons pratiques, tous les relevés n'ont pas pu être réalisés aux mêmes dates : les digitalisations ont été groupées à des périodes favorables du point de vue du climat (sans vent ni pluie). Les mesures de diamètres et les relevés sur les axillaires ont été faits simultanément entre deux campagnes de digitalisation.

Les premières mesures de la saison ont eu lieu début Février, avant le commencement de la croissance. La seconde série de mesures a été réalisée huit semaines après. Ensuite, les mesures ont été répétées toutes les 3 à 4 semaines jusqu'à fin août (toutes les 2 à 3 semaines pour l'échantillon de validation). Une série de mesures supplémentaire a été réalisée le jour de la récolte des fruits, afin d'observer le redressement des axes. Fin septembre, un relevé a été effectué après l'arrêt de la croissance de toutes les pousses et un autre mi-novembre, après la chute des feuilles et avant prélèvement des axes. Au total, les axes ont été observés 8 à 12 fois dans la saison pour chaque type de mesure.

⁴ Le poids propre agit lui aussi en tant que charge pour la flexion des axes, mais ses caractéristiques peuvent être déduites de celles de la structure. Le « chargement » tel qu'on le définit ici ne rassemble que les caractéristiques des organes qui doivent être décrites pour poser le problème mécanique sur une structure connue par ailleurs.

L'échantillon est divisé en trois variétés qui présentent des décalages de phénologie. De plus, l'échantillon de validation a été mesuré plus fréquemment. Les dates de mesure ne sont donc pas identiques pour chaque sous échantillon. Le tableau 1 indique pour chaque sous échantillon les dates des semaines de l'année où chaque type de mesure a été réalisé.

2.1.3. Repérage des mesures locales

Au moment de l'échantillonnage, la longueur des axes a été relevée (de la base à l'extrémité) au demi-centimètre près à l'aide d'un mètre ruban. Le nombre d'entrenœuds dont est constitué chaque axe a été compté. Des points régulièrement espacés ont été repérés et marqués au Typex. La distance entre points est de 10 cm pour l'échantillon principal et de 5 cm pour l'échantillon de validation. Afin d'avoir plus de précision à la base des axes, trois points supplémentaires ont été ajoutés au niveau du segment basal (à 2.5 cm, 5 cm et 7.5 cm de l'insertion de l'axe). On désignera la portion d'axe comprise entre deux marques par le terme de segment. Les points sont tous situés sur la même génératrice de l'axe⁵. Ces points constituent le schéma de discrétisation des axes qui a été utilisé pour les mesures de morphologie et de géométrie.

2.2. Mesure de la morphologie

2.2.1. Mesures de diamètre

Le diamètre de tous les axes au niveau de chaque point de mesure a été mesuré avec un pied à coulisse précis au 1/100^{ième} de millimètre. Les diamètres mesurés étant de l'ordre du centimètre, les mesures ont été arrondies au 1/10^{ième} de mm lors de la saisie. Deux précautions ont été prises lors des mesures :

- afin d'éviter les artefacts dus à la présence de nœuds et de structures axillaires en croissance, les diamètres ont toujours été relevés au niveau du milieu de l'entre-nœud le plus proche de la marque correspondant théoriquement au point de mesure.
- les sections n'étant jamais parfaitement circulaire, nous avons choisi de toujours mesurer le diamètre dans la même direction, afin d'augmenter la répétabilité de la mesure. Compte tenu des implications des mesures de diamètre dans les modèles mécaniques, nous avons toujours relevé le diamètre dans la direction verticale, c'est à dire en positionnant la mâchoire du pied à coulisse dans un plan vertical.

2.2.2. Mesure du méplat

La caractérisation de la morphologie transverse des axes par leur seul diamètre n'est pertinente que si les sections sont de forme à peu près circulaire. Le méplat des axes a été évalué pour vérifier cette hypothèse. Le 20/08/99, le diamètre à tous les points de mesure de tous les axes de l'échantillon de validation a été mesuré deux fois : une fois avec la méthode habituelle (D_V) et une fois dans la direction orthogonale (D_H) (cf. figure 1).

2.2.3. Répétabilité des mesures de diamètre

Pour quantifier l'incertitude sur les diamètres dans nos conditions de mesure, une étude sommaire de la répétabilité des mesures a été réalisée. L'étude a consisté à mesurer de façon répétée le diamètre à tous les points d'un même axe. L'axe choisi présentait 29 points de mesure. Les mesures de diamètre

⁵ Les points sont situés à la surface des axes, au milieu de la face latérale. Rigoureusement, la ligne directrice d'un axe est la ligne qui joint les centres des sections. Les coordonnées sont donc systématiquement biaisées d'une valeur égale au rayon de la section correspondante. Compte tenu de l'élanement des axes, nous négligeons ce biais.

ont été répétées 4 fois. Pour chaque point, on a calculé de coefficient de variation de la mesure sur les 4 répétitions. Le coefficient de variation des mesures a toujours été trouvé inférieur à 5%. Sa moyenne sur les 29 points de mesure est 2.1%. L'incertitude est donc de quelques dixièmes de millimètres, ce qui justifie le fait d'arrondir la mesure au dixième de millimètre le plus proche. Ce chiffre quantifie l'erreur commise par l'expérimentateur, qui ne positionne pas toujours le pied à coulisse exactement de la même manière (l'erreur liée à la précision du pied à coulisse peut être considérée comme négligeable).

2.3. Mesure de la géométrie

Différentes méthodes existent pour mesurer la géométrie de plantes. Pour une revue détaillée et référencée de ces méthodes de mesure, voir Sinoquet et al. (1997). Le choix d'une méthode de mesure de la géométrie est conditionnée par différents critères : précision de la mesure, facilité de mise en œuvre et possibilités d'utilisation au champ. Nous avons opté pour la méthode de digitalisation magnétique, qui semble la plus adaptée pour la mesure de structures végétales au champ (Sinoquet et al. 1997).

2.3.1. Utilisation du digitaliseur 3D magnétique

➤ Dispositif expérimental

Les mesures ont été réalisées avec un digitaliseur magnétique Polhemus® Long Ranger (Polhemus 1993).

Les principaux éléments du dispositif sont :

- un émetteur « long ranger ». C'est une sphère de plastique d'environ 50 cm de diamètre, montée sur un socle et contenant trois bobines orthogonales qui émettent un champ magnétique de 4.5 m de rayon environ.
- un capteur permettant de pointer n'importe quel point de l'espace et de mesurer le signal émis par l'émetteur. La position du point dans l'espace peut être déduite de ce signal. Nous avons utilisé deux type de capteurs ('stylus' ou 'PIAF') qui ne diffèrent que par des caractéristiques mineures⁶.
- un boîtier central, relié à l'émetteur, au capteur, au micro-ordinateur et à l'alimentation.
- un micro-ordinateur portable, qui stocke les données mesurées par l'intermédiaire d'un logiciel adéquat. Nous avons utilisé le logiciel d'acquisition *Pol31*.
- un référentiel géométrique, constitué par une équerre rigide et un niveau à bulle.
- une alimentation électrique.

Ce dispositif est illustré sur la figure 2. La mise en œuvre des mesures se fait en deux étapes : initialisation et acquisition des données.

➤ Etape d'initialisation

L'étape d'initialisation consiste à disposer les différents éléments et à préciser le référentiel dans lequel les coordonnées seront mesurées. L'émetteur est positionné à proximité des structures végétales à mesurer. Les mesures ne peuvent se faire simultanément que dans un seul hémisphère de l'émetteur : celui-ci doit donc être placé de façon à ce que tous les objets pointés soient dans le même hémisphère, pour ne pas avoir à changer d'hémisphère au cours de l'acquisition. Le système de référence est

⁶ le capteur 'PIAF' permet de relever non seulement la position d'un point de mesure, mais aussi l'orientation de la direction de mesure. Nous n'avons pas exploité le second type d'information.

ensuite positionné dans cet hémisphère, de sorte que l'équerre soit horizontale. L'opérateur pointe alors successivement sur les trois sommets de l'équerre pour fixer le référentiel (origine et deux directions de référence) dans lequel seront exprimées toutes les coordonnées.

➤ Acquisition des données

L'acquisition des données consiste à pointer sur les différents points de l'espace dont on veut connaître les coordonnées. Chaque point mesuré est enregistré par le micro-ordinateur. Les fichiers de mesure sont des fichiers texte portant l'extension « .d3d », constitués d'une entête et d'un enregistrement par point mesuré. Les enregistrements sont composés de 7 colonnes indiquant : un éventuel code d'erreur, les coordonnées (X, Y, Z) du point mesuré, les angles d'Euler (A, B, C) de la direction de mesure.

➤ Contraintes expérimentales

Ces mesures sont soumises à différentes contraintes expérimentales :

- l'appareillage nécessite une alimentation électrique, ce qui pose des problèmes pratiques pour les expérimentations en plein champ. Dans notre cas, l'alimentation a été assurée par un câble relié à des bâtiments proches du terrain d'expérimentation.
- le rayon d'action de l'appareil est relativement grand (4.5 m), mais pas suffisant pour couvrir l'ensemble des axes sur lesquels nous avons fait les mesures. Pour chaque arbre, il a fallu déplacer l'ensemble du dispositif et procéder à l'étape d'initialisation.
- l'appareil est sensible à la présence d'objets métalliques dans son champ d'action. Ce point impose des contraintes sur le choix du matériel (équerre, échelles, etc.) et sur la disposition des éléments du dispositif.
- les mesures ne peuvent pas se faire par temps venteux, car la position des rameaux n'est alors plus fixe dans l'espace, et la fiabilité des mesures se trouve dramatiquement diminuée.
- l'appareillage est sensible aux conditions climatiques telles que la pluie ou le froid.

2.3.2. Répétabilité de la mesure

Une étude succincte de la répétabilité des mesures de digitalisation dans nos conditions, avec notre matériel, a été menée dans le but de quantifier l'incertitude de mesure et de raisonner les précautions prises lors des expérimentations. Cette étude est décrite en détail en annexe 4. Il en ressort que l'erreur de répétabilité de la mesure est inférieure au millimètre si on se situe à moins de deux mètres de l'émetteur, et qu'elle est toujours inférieure à 5 mm dans la zone de travail.

2.3.3. Visualisation des séries de points

Les séries de points correspondant à chaque axe ont été visualisées grâce au logiciel *AMAPview*. Ce logiciel permet de représenter des objets tridimensionnels, de leur faire subir des translations et rotations afin d'avoir différents angles de vue. Il fonctionne à partir de fichiers d'un format particulier (« .lnt », « .inf » et « .dta »). Ces fichiers permettent de concevoir une représentation « habillée » des objets, incluant des couleurs et un certain nombre de formes prédéfinies. Nous avons choisi de nous limiter à la représentation la plus simple possible, c'est à dire la représentation filaire (la structure est représentée comme un ensemble de segments jointifs). L'étape de visualisation permet d'apprécier rapidement le réalisme des formes mesurées et de détecter les éventuelles erreurs de mesure.

2.3.4. Validation des mesures

La visualisation fournit une première validation qualitative de la mesure. Pour la compléter, nous avons exploité le fait que les distances réelles entre points de mesure ont été imposées lors de la discrétisation des axes. Les longueurs de segments ont été recalculés à partir de coordonnées mesurées, et comparées à leur longueur théorique (10 cm pour l'échantillon principal et 5 cm pour l'échantillon de validation). Cette procédure de validation a montré que le biais de mesure est en général inférieur à 5%. Elle a permis de révéler quelques erreurs dans les données saisies (points doubles, qu'on ne peut pas détecter à la visualisation).

2.3.5. Transformations géométriques

Les séries de points ont subi diverses transformations géométriques, afin d'être plus facilement exploitables.

➤ Projection 2D

Afin de faciliter l'analyse de la géométrie et de fournir des données pour les modèles de flexion 2D, les séries de points ont été projetées dans leur « plan vertical principal ». Ce plan correspond au plan vertical qui contient la part maximale de la variance du nuage de point. Pour le déterminer, il faut déterminer l'axe principal de la projection du nuage sur un plan horizontal (cf. figure 3). Le plan vertical principal est celui qui passe par cet axe et la direction verticale. Il résume en moyenne plus de 98% de la variance du nuage, ce qui indique que les axes sont très bien représentés par leur projection dans le plan vertical.

➤ Rotations et translations

Afin d'aligner toutes les géométries dans un même repère, les séries de points ont été translattées de sorte que la base des axes se confonde avec l'origine du repère. On a ensuite procédé à une rotation du nuage autour de la direction Z , de sorte que les points soient contenus dans le plan (X, Z) .

➤ Automatisation des prétraitements

Les prétraitements ont été implémentés dans un programme exécutable écrit en C++, nommé *convertG.exe*. Ce programme réalise la vérification des longueurs des segments, la détermination du plan de projection, la projection dans ce plan, la rotation et la translation du nuage de point, ainsi que la conversion du format « .d3d » au format d'entrée d'*AMAPview*.

2.4. Mesure du chargement axillaire

Au cours du suivi de croissance, le chargement n'a pas pu être mesuré directement car les mesures de masse impliquent le prélèvement des organes. On l'a donc mesuré de façon indirecte en relevant les attributs morphologiques de toutes les productions axillaires, puis en estimant la masse des productions en fonction de ces attributs sur un échantillons d'organes analogues.

2.4.1. Différents organes impliqués

Les axes suivis sont des pousses annuelles monocycliques développées durant l'année 1998, en deuxième feuille durant l'année 1999. Ils sont constitués d'une succession de plusieurs dizaines d'entrenœuds. La position topologique des productions axillaires est donnée par le rang du nœud qui les porte.

Chaque nœud porte un bourgeon végétatif et un nombre variable (0, 1 ou 2) de bourgeons floraux (Costes 1993). Le bourgeon végétatif n'est pas toujours viable (il est parfois nécrosé ou

insuffisamment développé). S'il est viable, il peut soit rester dormant, soit débourrer et donner naissance à une pousse. Une certaine proportion des bourgeons floraux se transforme en fleurs, et, après fécondation, évolue en fruits. Les chutes de fleurs et de jeunes fruits sont fréquentes. D'un point de vue mécanique, les bourgeons nécrosés, les bourgeons dormants et les fleurs qui n'évoluent pas en fruit n'ont pratiquement pas d'incidence car leur masse est négligeable. Dans les relevés, on ne s'est pas attaché à ces cas : pour chaque nœud, on a suivi uniquement la ou les productions axillaires qui constituent des charges, c'est à dire au plus une pousse et un à deux fruits.

2.4.2. Caractérisation de la morphologie des productions axillaires

La morphologie des fruits a été caractérisée par leurs dimensions. Les abricots d'une variété donnée ont une forme assez peu variable, ce qui permet en général d'établir des relations d'allométrie satisfaisantes entre leurs dimensions (Chambon 1995). On a mesuré seulement leur diamètre, définie comme la plus grande dimension orthogonale à l'axe du fruit.

Nous avons distingué deux types de pousses en fonction de leur longueur. Les pousses ont été classées en « pousse courte » si elles mesurent moins de 10 cm, et en « pousse longue » si elles dépassent 10 cm. Le prolongement sympodial de l'axe, qui est botaniquement équivalent aux autres pousses, n'a pas été noté de façon particulière : c'est une pousse courte ou longue selon le cas, située sur le dernier entrenœud.

Pour toutes les pousses, on a relevé le nombre de feuilles. Seules les feuilles d'une longueur supérieure à 2.5 cm ont été comptées (les feuilles plus petites ont une masse très faible et tombent souvent en cours d'année). Pour les pousses longues, on a relevé de plus le diamètre à la base et la longueur totale de la pousse.

2.4.3. Allométrie de la masse des fruits

A cinq reprises dans l'année, 30 à 40 fruits de chaque variété ont été prélevés au verger (29/03, 22/04, 10/05, 27/05 et 21/06). Les fruits ont été prélevés le matin sur des branches ne portant pas d'axe du suivi, et mesurés dans la journée. Le diamètre des fruits a été mesuré, puis leur masse déterminée à l'aide d'une balance précise à 0.1 g. La relation entre diamètre et masse a été établie pour chaque variété à partir de l'ensemble des fruits mesurés, soit 170 par variété. Nous avons utilisé une loi puissance dont les paramètres ont été estimés par régression : $M = \alpha d^\beta$, où M est la masse de l'organe et d son diamètre.

2.4.4. Allométrie de la masse des pousses courtes

Trois fois dans la saison (14/04, 19/04, 26/05), 5 axes d'un an de chaque variété ont été prélevés pour établir les lois d'allométrie des pousses. Les axes prélevés sont analogues à ceux de l'échantillon suivi. Les attributs de tous les axillaires ont été notés, puis ceux-ci ont été pesés avec une précision de 0.01 g. Les notations et pesées ont été réalisées le jour du prélèvement. Les axes ont été conservés dans des sacs hermétiques durant le transport, de sorte que la perte de turgescence des feuilles était quasiment nulle au moment de la pesée.

Au total, 350 pousses courtes de chaque variété ont été pesées. Différentes lois ont été essayées pour rendre compte de la relation entre nombre de feuilles et masse de la pousse. Une dépendance linéaire rend mal compte de cette relation car la dimension des feuilles est corrélée au nombre de feuilles. Nous avons finalement opté pour une dépendance en loi puissance :

$$M = \alpha n^\beta, \text{ où } M \text{ est la masse de l'organe et } n \text{ le nombre de feuilles.}$$

2.4.5. Allométrie de la masse des pousses longues

Toutes les pousses longues des axes de l'échantillon complémentaire (entre 20 et 40 par variété) ont été l'objet des mêmes notations que celles du suivi, puis pesées au centième de gramme près.

Afin de choisir l'attribut le plus pertinent pour établir la relation, nous avons regardé les corrélations entre la masse (ou son logarithme), la longueur, le nombre de feuilles et le diamètre à la base (ou leur logarithme). La corrélation la plus forte est trouvée entre le logarithme du nombre de feuilles et celui de la masse de la pousse, ce qui correspond à une loi de la même forme que celle des pousses courtes⁷ : $M = \alpha n^{\beta}$.

2.4.6. Allométrie de la masse de l'axe : masse volumique apparente

Nous avons exclu le poids propre de la notion de chargement de l'axe en se basant sur le fait que celui-ci peut être déduit des mesures de diamètres *via* la masse volumique du matériau. Le volume de l'axe peut être estimé à partir des données de diamètre associées aux segments. Nous définissons la masse volumique apparente (MVA) comme le coefficient qui permet de calculer la masse directement à partir des mesures de diamètre.

Ce paramètre a été estimé expérimentalement à partir des axes qui ont servi à estimer les lois d'allométrie des pousses. Pour 15 axes de chaque variété, nous avons mesuré le diamètre tous les 10 cm avec les mêmes précautions que pour les mesures faites *in situ*. Le volume a ensuite été calculé en assimilant chaque segment à un tronc de cône. D'autre part, la masse des axes a été relevée avec une précision de 0.1 g. La MVA (en kg/l) a été déterminée pour chaque axe comme le rapport entre la masse mesurée et le volume calculé.

⁷ La régression multiple sur toutes les variables mène à des estimations plus fines. Le gain de précision est cependant faible comparé à la complexification du modèle, aussi n'avons nous pas adopté cette possibilité.

III-3. Mesure des propriétés mécaniques des matériaux

3.1. Choix des méthodes de mesure

3.1.1 Principe de la mesure des propriétés mécaniques

Avant de mesurer les propriétés mécaniques d'un matériau, il est important de rappeler ce que sont ces propriétés. Nous avons dit au début de la partie II que les propriétés mécaniques d'un matériau étaient caractérisées par la déformation que subi un volume élémentaire de ce matériau sous l'effet de sollicitations. Ce qu'on appelle « propriétés mécaniques du matériau », est donc un paramètre (ou un ensemble de paramètres) qui permet(tent) de prévoir la déformation d'un petit volume de ce matériau, compte tenu de sollicitations qui lui sont imposées.

Cette définition fait implicitement appel à l'idée que le matériau est une entité homogène, caractérisée par des propriétés mécaniques parfaitement définies. La mesure de propriétés mécaniques serait alors la mise en œuvre de méthodes permettant d'estimer la valeur de paramètres caractérisant de façon intrinsèque le matériau, indépendamment de la structure qui en est composée. Dans le cas du bois, il nous faut préciser ce qu'on entend par homogénéité du matériau. Le bois présente plusieurs niveaux d'hétérogénéité : il est divisé en cernes annuels constitués de différents tissus, eux-mêmes constitués de différentes cellules dont la paroi est divisée en plusieurs couches, les couches sont elles mêmes constituées de microfibrilles... Qu'entend-on alors par « matériau bois » ? Il est clair que cette notion est indissociable de l'échelle à laquelle on regarde le bois. Les propriétés mécaniques de la cellulose sont différentes de celles des parois cellulaires isolées, elles-mêmes différentes des propriétés d'une portion de tissu ligneux. Le « matériau bois » est un concept qui dépend de l'échelle à laquelle on le définit, c'est à dire de l'échelle en dessous de laquelle on considère la matière comme une entité homogène. La distinction entre matériau et structure n'est pas une réalité physique absolue, mais dépend du choix d'une échelle d'homogénéisation.

Pour mesurer les propriétés mécaniques d'un bois, il nous faut considérer un volume donné de ce bois, et mesurer sa réaction sous l'effet de sollicitations qui lui sont imposées. Les sollicitations et la mesure de la réaction de la structure sont réalisées grâce à un dispositif expérimental. La valeur des paramètres caractérisant les propriétés mécaniques est calculée à partir d'une modélisation du dispositif expérimental. Le modèle permet, compte tenu de certaines hypothèses, d'établir des équations reliant les paramètres du dispositif expérimental (dimensions de l'échantillon, intensité des sollicitations, etc.), la réaction de la structure et les propriétés du matériau. Les premiers étant fixés et la seconde mesurée, on peut déterminer la valeur des paramètres qui caractérisent les propriétés mécaniques.

Il est important de noter que la mesure de propriétés mécaniques est toujours indirecte et soumise à un certain nombre d'hypothèses. Le rôle de l'expérimentateur est de choisir un dispositif adapté à ce qu'il veut mesurer, et de s'assurer de la pertinence des hypothèses implicites du modèle qui permet de déterminer la valeur des propriétés.

3.1.2. Echelle d'homogénéisation : choix de la structure mesurée

Choisir une échelle d'homogénéisation c'est choisir la dimension de la structure au sein de laquelle on considérera que les propriétés mécaniques sont homogènes. Nous nous intéressons aux propriétés

macroscopiques du bois, dans le cadre de la caractérisation du comportement mécanique d'axes ligneux. Dans ce contexte, différentes échelles d'homogénéisation ont été envisagées :

- une éprouvette usinée. Dans ce cas, l'hétérogénéité macroscopique de la structure mesurée est limitée au maximum. L'éprouvette peut être taillée au sein d'un tissu homogène. On détermine alors la valeur des propriétés homogénéisées pour ce tissu, qui intègre des hétérogénéités d'ordre microscopique.
- un tronçon d'axe le long duquel les variations de propriétés sont considérées comme négligeables. On détermine alors la valeur qui rend compte du comportement observé pour une structure similaire dont les sections seraient homogènes. Cette valeur intègre les hétérogénéités transverses du segment mesuré.
- l'axe dans son ensemble. La valeur des propriétés mécaniques qui est déterminée est celle qui rendrait compte du comportement observé pour un axe dont la structure est similaire, mais qui serait constitué d'un matériau homogène. Cette valeur intègre les hétérogénéités longitudinales et transverses de l'axe.

L'hétérogénéité des propriétés mécaniques au sein d'une section est évidente : l'écorce, le bois et la moelle sont des tissus dont on peut attendre qu'ils se comportent différemment. Cependant, du fait des hypothèses cinématiques de la théorie des poutres (II-1.2.2), il ne nous est pas nécessaire de connaître le détail de ces hétérogénéités pour prévoir la déformation d'un axe ligneux. L'hypothèse de section homogène, si elle n'est pas réaliste du point de vue biologique, est justifiée d'un point de vue mécanique tant qu'on ne s'intéresse qu'à l'évolution de la forme de l'axe (et non à l'état interne des contraintes). La valeur des propriétés mécaniques homogénéisée sur la section permet de rendre compte avec exactitude du comportement de la structure en théorie des poutres, même si les hétérogénéités transverses sont en réalité importantes. Il n'est pas nécessaire de vérifier cette hypothèse pour valider le calcul. En revanche, l'hypothèse d'homogénéité longitudinale des propriétés n'est pas sans incidence du point de vue mécanique. La détermination d'une valeur unique des propriétés pour un axe ne permet de rendre compte de son comportement mécanique que si elle est justifiée en réalité. La différence de nature entre ces deux hypothèses dans le cadre de la théorie des poutres est subtile mais importante. La violation de la première est sans incidence mécanique (tant qu'on ne s'intéresse qu'à la forme), alors que celle de la seconde ne l'est pas. Si l'axe présente réellement des hétérogénéités matérielles longitudinales, aucune valeur homogénéisée ne permet de rendre compte de son comportement au niveau local. Pour être justifiée, cette hypothèse doit être validée par l'expérience. Des mesures ont donc été faites sur des segments prélevés à différents abscisses des axes pour tester cette hypothèse dans le cas de l'abricotier.

Dans ce travail, seules les deux dernières échelles (celles de l'axe et du tronçon d'axe) ont été considérées. Ces échelles fournissent des informations suffisantes dans notre cadre d'application, puisqu'elles permettent de rendre compte du comportement mécanique sans avoir à détailler la constitution de la section (et donc sans avoir à considérer un modèle de section composite).

3.1.3. Choix du mode de sollicitation

De nombreux dispositifs expérimentaux ont été mis au point pour mesurer les propriétés mécaniques d'un matériau, en général dans le but d'en évaluer les qualités technologiques. Les dispositifs diffèrent par le type de propriété qu'ils sont destinés à mesurer et par le type de sollicitation imposée. Nous nous sommes limités aux méthodes destinées à mesurer les propriétés qui sont utiles à notre propos, c'est à dire les propriétés élastiques et visco-élastiques du bois dans sa direction longitudinale

d'orthotropie, et dans des conditions naturelles de température et d'humidité. On peut distinguer différentes méthodes en fonction de la nature de la sollicitation :

- les essais à efforts imposés consistent à appliquer une force ou un couple de force sur la structure, et à mesurer la déformation qui en résulte. Selon le mode de sollicitation envisagé, on distingue notamment les essais en traction, en compression, en flexion et en torsion.
- les essais en déplacements imposés consistent à appliquer une déformation à la structure et à mesurer les contraintes qui apparaissent au sein de celle-ci. Là encore, on distingue autant de types d'essais que de modes de sollicitation.
- les essais dynamiques sont basés sur un principe différent. Il s'agit de faire vibrer la structure, et de mesurer ses fréquences propres de vibrations par une méthode acoustique. Les fréquences peuvent être reliées aux propriétés du bois par un modèle mécanique dynamique (Bordonné 1989).

Nous avons choisi de réaliser toutes nos mesures à efforts imposés. En effet, c'est ce type de sollicitation qui intervient lors de la flexion d'un axe en port libre, et c'est sous cet angle que nous avons posé les bases théoriques des calculs mécaniques dans la partie II.

3.1.4. Choix des dispositifs expérimentaux

Les mesures ont été réalisées sur les deux types de structures envisagées : des tronçons d'axes et des axes entiers.

La section 3.2 est consacrée à la présentation de la méthodologie et de la mise en œuvre des mesures sur tronçons. Deux dispositifs de flexion ont été utilisés : banc d'essai « 3 points » et « 4 points ». L'objectif est de déterminer les constantes élastiques des tronçons, dans le but d'étudier différentes sources de variabilité (variété, diamètre du tronçon, position dans la pousse annuelle, âge du tronçon). Les essais de flexion sur banc d'essai sont des méthodes très éprouvées dans le cadre de l'application à des éprouvettes usinées. On adoptera un regard critique sur l'adaptation de ces méthodes à des mesures sur tronçons d'axe. La différence réside essentiellement dans le fait que, contrairement aux mesures sur éprouvettes usinées, la géométrie de la structure n'est pas régulière. On détaillera les hypothèses sous-jacentes au calcul de l'élasticité avec cette méthode, pour s'intéresser aux conséquences de ces irrégularités et à la possibilité d'en tenir compte.

En outre, quelques essais de torsion seront présentés. Ces essais ont été mis en œuvre pour déterminer dans quelle mesure ce mode de sollicitation peut être négligé.

Dans la section 3.3, la méthodologie et la mise en œuvre des essais de flexion sur axes entiers *in situ* sont présentées. L'objectif est de déterminer les constantes élastiques de structure caractérisant le comportement en flexion à l'échelle de l'axe. Dans la section 3.4 seront présentées la méthodologie et la mise en œuvre des essais de fluage sur axes entiers *in situ*. L'objectif est d'évaluer l'importance de la composante visco-élastique du comportement du matériau constitutif des axes.

3.2. Mesures sur tronçons d'axes

3.2.1. Dispositifs de mesure des essais de flexion

Les dispositifs de flexion 3 points et 4 points sont analogues pour l'essentiel. Dans les deux cas, le tronçon, de dimension connue, est disposé horizontalement sur deux supports dont l'écartement est fixé. Un effort connu est appliqué au tronçon par l'intermédiaire d'un poids, qui lui impose de fléchir. La flexion est mesurée à l'aide d'un système optique par le déplacement vertical du milieu du tronçon (figure 5b). La différence entre les dispositifs 3 points et 4 points réside dans la manière dont sont

répartis les efforts. Lors d'une flexion 3 points, les efforts sont appliqués en un point unique, situé au milieu du tronçon (figure 5a). Lors d'une flexion 4 points, les efforts sont répartis en deux points situés symétriquement par rapport au milieu du tronçon. Deux types de dispositifs 4 points sont envisageables selon que les points d'application des efforts sont situés à l'extérieur ou à l'intérieur des appuis (figures 6 a et b). Nous nous sommes limités au premier cas (effort à l'extérieur des appuis).

On désigne par L la distance entre les points d'appuis et a la distance entre un point d'appuis et le point d'application de la demi charge (pour le cas de la flexion 4 points). Le banc d'essai sur lequel les mesures ont été réalisées permet de fixer ces distances afin de les adapter au tronçon mesuré. La distance entre appuis a été fixée à $L = 30$ cm pour les flexions 3 points, $L = 15$ cm et $a = 6$ cm pour les flexions 4 points. Les efforts sont imposés par l'intermédiaire de plateaux accrochés aux tronçons, sur lesquels on pose des masses. Les masses imposées varient entre 10 g et 1300 g selon le diamètre des tronçons. Le déplacement est mesuré grâce à un oculaire gradué positionné devant le milieu des appuis. La photo présentée figure 4 montre le dispositif utilisé. La lecture est faite avec une précision de quelques centièmes de millimètre. On a attendu quelques dizaines de secondes entre l'application de la charge et la lecture de la flèche, de façon à ce que l'équilibre se fasse. Pour chaque tronçon, la mesure a été répétée 7 fois, en utilisant des charges croissantes.

3.2.2. Mise en œuvre des mesures

Les mesures sur banc d'essai ont été réalisées pendant les semaines suivant le prélèvement des axes, en Décembre 1999. Au sein de chaque axe prélevé, 2 à 4 tronçons longs d'un peu plus de 30 cm, situés à des positions variées dans l'axe, ont été découpés à l'aide d'un sécateur. La longueur choisie correspond à un compromis entre les contraintes liées au dispositif (les déflexions observées pour des longueurs inférieures sont beaucoup plus faibles, leur mesure est donc soumise à une trop forte incertitude relative) et le respect des hypothèses du modèle de flexion sous-jacent (à partir d'une certaine longueur, il devient difficile de trouver un tronçon à la fois peu conique et rectiligne). Leur diamètre varie entre 5 et 18 mm, ils ont été choisis aussi cylindriques et homogènes que possible. Les tronçons sont âgés de 2 ans, et n'ont pas été écorcés avant les mesures, afin d'obtenir une valeur de module de structure intégrant tous les tissus impliqués dans la flexion naturelle.

Les tronçons ont été l'objet d'essais en flexion avec l'une ou l'autre des méthodes. Pour des raisons pratiques⁸, nous avons réservé pour les flexions 4 points ceux qui avaient le plus petit diamètre. Les essais de flexion 3 points ont été réalisés sur 16 tronçons de 'Lambertin', 22 de 'Modesto' et 14 de 'Palsteyn'. Les essais de flexion 4 points ont été réalisés pour 12 tronçons de 'Lambertin', 11 de 'Modesto' et 14 de 'Palsteyn'.

L'un des objectifs des mesures de module que nous avons réalisées est de renseigner les modèles de simulation de la flexion des axes d'un an en croissance. Or, du fait de la nature destructive de la mesure, l'élasticité du bois n'a été observée qu'à deux ans pour l'échantillon suivi. Quelques mesures supplémentaires ont été réalisées pour tester si les mesures faites à deux ans sont représentatives du module d'élasticité des axes en cours d'année. Pour chaque variété, 5 tronçons de bois de 1 an ont été prélevés sur des axes équivalents aux axes de l'échantillon principal tels qu'il étaient début 1999. Des mesures de flexion 3 points ont été réalisées dans les mêmes conditions que celles réalisées sur les tronçons issus de l'échantillon principal (mêmes critères de choix des tronçons et même dispositif expérimental).

⁸ Pour une masse appliquée identique, le dispositif 4 points entraîne un déplacement 6 fois inférieur au dispositif 3 points. Nous avons donc choisi les plus petits diamètres, afin d'avoir un déplacement suffisant pour une bonne lecture.

3.2.3. Dépouillement des essais

➤ Méthode usuelle

Soit I l'inertie en flexion du tronçon, P le poids imposé et f le déplacement du milieu du tronçon. Soient L et a les distances caractéristiques du banc d'essai, telles que nous les avons définies précédemment. Le module d'élasticité, E , est donné par :

$$E = L^3 P / 48 I f \quad (\text{en flexion 3 points})$$

$$E = a L^2 P / 16 I f \quad (\text{en flexion 4 points})$$

Les longueurs a et L , ainsi que le poids P sont maîtrisés et connus avec une grande précision (en pratique, l'incertitude est bien inférieure à 1%). Par contre, la flèche f est mesurée au cours de l'expérience. En pratique, les déplacements observés sont de l'ordre du millimètre et, selon l'appareillage de mesure, peuvent être sujets à une incertitude importante (jusqu'à 10%). D'autre part, le tronçon peut avoir un comportement en flexion pas tout à fait linéaire. Pour pallier à ces deux problèmes, nous avons réalisé des séries de mesures avec une charge croissante. Chaque série consiste en une série croissante de poids P_i et une série de déplacement f_i par rapport à la position initiale. La régression $f = \alpha P + \beta$ permet de juger de la linéarité du comportement : le coefficient de corrélation doit être proche de 1, les résidus ne doivent pas être structurés, et la valeur de β ne doit pas être significativement différente de 0. D'autre part, la valeur de α nous permet de calculer directement une estimation robuste de E :

$$E = L^3 / 48 I \alpha \quad (\text{en flexion 3 points})$$

$$E = a L^2 / 16 I \alpha \quad (\text{en flexion 4 points})$$

➤ Analyse critique des hypothèses sous-jacentes

La détermination du module d'élasticité par la formule habituelle est basée notamment sur les hypothèses suivantes :

- 1- les appuis sont fixes et peuvent être assimilés à des appuis ponctuels.
- 2- le tronçon ne glisse pas le long des appuis lors de la déformation.
- 3- le tronçon est initialement droit.
- 4- le tronçon ne se déforme qu'en flexion.
- 5- la rigidité est constante le long du tronçon.

L'hypothèse 1 ne dépend que des caractéristiques du dispositif et est très largement vérifiée.

L'hypothèse 2 est justifiée si la prise de courbure du tronçon reste relativement faible. On peut s'y conformer en imposant un effort adapté, et on peut la vérifier par l'observation lors de la mise en œuvre de la mesure.

L'hypothèse 3 (rectitude du tronçon) peut en général être vérifiée pour des tronçons de tiges, moyennant le choix d'un échantillon adéquat.

L'hypothèse 4 est vérifiée au moins partiellement : il est facile de montrer que le tronçon n'est soumis à aucun effort de traction ou de compression longitudinal, ni à aucun effort de torsion. Pour être rigoureux, il nous faut envisager la possibilité d'un couplage entre flexion et traction, qui impliquerait une élongation du tronçon. Ce couplage est nul si le centre d'inertie de la section se confond avec son centre de flexion, ce qui peut être en général considéré comme vrai pour un tronçon axisymétrique. D'autre part, il nous faut négliger l'effet des cisaillements transverses. On peut montrer que ceux-ci sont effectivement nuls dans le cas de la flexion 4 points. Ils ne le sont pas rigoureusement dans le cas de la flexion 3 points, mais on peut négliger leur effet dès que le tronçon a un élancement suffisant.

Enfin, nous envisagerons ultérieurement (IV-2.1.2) la perturbation due à la compression radiale du tronçon au niveau des appuis.

L'**hypothèse 5** est, dans le cas d'un tronçon d'axe réel, la plus forte de toutes. On peut s'assurer de l'homogénéité des propriétés matérielles en choisissant un tronçon le long duquel on soupçonne que la composition tissulaire de la section est constante. C'est en général le cas pour une portion de tige prélevée dans une seule unité de croissance (bien qu'on ne puisse pas toujours exclure la présence de singularités anatomiques locales telles que le bois de réaction).

Par contre, la question de la constance de l'inertie est beaucoup plus problématique, car les tiges présentent la plupart du temps un défilement plus ou moins important. Une solution consiste à ne choisir que les portions de tige sur lesquelles le défilement est le plus faible. La condition de faible conicité se cumule aux conditions imposées par les autres hypothèses : il nous faut un tronçon droit, suffisamment long pour négliger les cisaillements, et suffisamment court pour négliger la conicité... Selon le matériel sur lequel on travaille, ces conditions peuvent rendre le choix d'un tronçon difficile, voire impossible. De plus, le fait de s'imposer un choix du matériel sur des critères pratiques peut être contradictoire avec l'objectif de l'étude, et en biaiser les résultats. Les paragraphes qui suivent s'intéressent plus particulièrement à la manière dont on peut pallier à ce problème, soit en négligeant la conicité et en utilisant une inertie de structure, soit en tenant explicitement compte de la conicité dans la procédure de dépouillement.

3.2.4. Inertie de structure d'un tronçon

En première approche, il est peut être légitime de négliger les variations de section de long du tronçon, et de calculer le module d'élasticité en faisant l'hypothèse 5. Le problème qui se pose à l'expérimentateur est, dans ce cas, de renseigner la valeur de l'inertie du tronçon. Le tronçon n'étant pas caractérisé par un diamètre unique, il nous faut une valeur de structure intégrant les variations de diamètre. Diverses méthodes de détermination de cette inertie ont été envisagées et comparées. Ces méthodes diffèrent par le nombre de mesures de diamètre et la façon de les combiner pour obtenir une inertie moyenne (en particulier, faut-il d'abord moyenniser les diamètres, puis calculer l'inertie, ou faut-il calculer l'inertie équivalente à chaque diamètre, et en faire la moyenne). La comparaison de ces méthodes est présentée en annexe 5. Les méthodes aboutissent à des estimations de l'inertie de structure qui varient de -2% à $+6\%$ par rapport à la méthode de référence. La méthode que nous avons retenue est la suivante : le diamètre du tronçon est mesuré dans la direction de la sollicitation et dans la direction orthogonale en trois points du tronçons (le milieu et les extrémités). L'inertie moyenne de chaque moitié du tronçon est calculée analytiquement en assimilant chaque moitié à un tronçon de cône. L'inertie de structure est finalement calculée comme la moyenne des inerties de ses deux moitiés.

3.2.5. Correction liée à la conicité du tronçon

La détermination analytique de la flèche pour un tronçon conique ne mène pas à une formulation simple (à cause de la rupture de symétrie du problème que cela impose), aussi avons nous choisi de tenir compte de la conicité par une correction directe à utiliser sur la valeur de l'élasticité. Cette correction a été établie pour une flexion 3 points, à partir de valeurs tabulées tirées de Young (1989). L'ouvrage donne le facteur de correction à appliquer pour obtenir la flèche dans un cas conique à partir de la flèche dans un cas non conique à diamètre équivalent à l'extrémité fine. Les facteurs de correction sont tabulés en fonction du rapport entre les inerties des extrémités du tronçon. Nous les avons exprimés en fonction du rapport de diamètres (gros bout / fin bout), pour un cas non conique à diamètre moyen équivalent. La correction pour un rapport de diamètre donné est déterminée par interpolation linéaire sur les valeurs tabulées. Les facteurs étant supérieurs à 1, ceci signifie que, pour

un matériau d'élasticité donnée, un tronçon conique accuse une flèche plus importante qu'un tronçon cylindrique. La méthode usuelle d'estimation de E (sans correction) implique donc une sous-évaluation de l'élasticité. Pour obtenir la valeur corrigée de l'élasticité, il faut multiplier par le facteur de correction la valeur obtenue par le calcul classique. Le tableau ci-dessous donne les facteurs de correction en fonction des rapports de diamètres.

Rapport de diamètres	1.0	1.15	1.3	1.45	1.6
Facteur de correction	1.0	1.005	1.019	1.033	1.065

Si on se réfère aux rapports de diamètres mesurés sur des tronçons de deux ans d'abricotier lors de l'étude méthodologique sur le calcul de l'inertie (annexe 5), le fait de négliger l'effet de la conicité amène une sous-évaluation de l'élasticité de moins de 1% en moyenne.

Une formule explicite permettant de prendre en compte la conicité dans des essais 3 points a été trouvée dans la littérature (Cannell et Morgan 1987). Cette formule mène à une correction très largement supérieure que celle donnée par les valeurs tabulées utilisées ici (voir annexe 6). Les deux auteurs étant en désaccord nous n'avons pas tenu compte de la correction dans l'estimation du module⁹.

Nous avons par contre utilisé la méthode d'estimation de l'inertie sélectionnée au 3.2.4, après avoir choisi les tronçons les moins coniques possibles.

3.2.6. Mesure de module de cisaillement en torsion

Nous ne nous attarderons pas sur les détails expérimentaux de cette mesure. Le dispositif permet de fixer le tronçon à l'une de ses extrémités, et d'imposer un effort en torsion à l'autre extrémité par l'intermédiaire d'un ressort. On mesure alors l'angle de rotation du tronçon. La modélisation mécanique permet, pourvu qu'on ait une estimation de l'inertie en torsion et compte tenu de certaines hypothèses, de calculer la valeur de G . Les mesures ont été réalisées sur des tronçons de 1 an analogues à ceux utilisés pour les essais de flexion, 8 de 'Lambertin', 5 de 'Modesto' et 8 de 'Palsteyn'.

3.3. Essais de flexion sur axes entiers *in situ*

Nous avons mis en œuvre des essais de flexion à l'échelle de l'axe. Ces essais présentent 2 avantages :

- on peut les réaliser *in situ*, c'est à dire dans les conditions exactes de la flexion naturelle.
- ils ne sont pas destructifs.

3.3.1. Dispositif expérimental

Le principe général d'un essai de flexion *in situ* sur un axe est le suivant : la forme de l'axe, ses dimensions transverses et son chargement sont mesurés localement dans l'état initial. Un chargement connu est alors appliqué (en attachant une masse), puis la forme de l'axe est mesurée de nouveau par digitalisation. Un modèle mécanique permet alors, moyennant un certain nombre d'hypothèses, d'en déduire la valeur des propriétés mécaniques qui nous intéressent.

3.3.2. Mises en œuvre des mesures

Des essais de mise en flexion *in situ* ont été conduits le 18/02/99 sur les axes de l'échantillon de validation (5 par variété). Les mesures de digitalisation et de diamètres ont été réalisées selon le

⁹ Après vérification, il semble que l'erreur vienne de la formule fournie par Cannell et Morgan (J. Gril, communication personnelle).

schéma de discrétisation imposé en début de saison pour cet échantillon (un point tous les 5 cm). Pour la mise en charge, une masse de 185 g a été attachée aux trois-quarts de la longueur de l'axe. La forme finale a été mesurée 5 à 10 minutes après imposition de la charge. Le calcul du module de structure a été réalisé sous *ModelMeca2.1*.

3.3.3. Dépouillement des essais

Nous allons présenter deux méthodes de dépouillement de ces essais dans le cadre de la théorie des poutres, basées sur deux hypothèses communes :

- l'axe est parfaitement encastré à sa base.
- l'axe n'est déformé qu'en flexion plane.

La différence entre les méthodes concerne la troisième hypothèse, relative à la distribution des propriétés matérielles dans l'axe, c'est à dire à l'échelle d'homogénéisation considérée :

- avec la méthode de **dépouillement local** on suppose que les propriétés matérielles sont *a priori* différentes en chaque abscisse de l'axe (homogénéisation à l'échelle de la section).
- avec la méthode de **dépouillement global**, on suppose que les propriétés matérielles sont homogènes à l'échelle de l'axe.

3.3.4. Dépouillement local d'un essai

Le dépouillement local consiste en une application directe de la théorie des poutres en flexion. Moulia (1993) a utilisé ce type d'essai pour analyser la distribution des propriétés mécaniques le long de feuilles de maïs. Il s'agit de déterminer la valeur d'élasticité en tout abscisse s qui rende exactement compte de la déformée mesurée compte tenu des données initiales. L'équilibre final implique que pour tout point s :

$$\Delta C(s) = \Delta M(s) / E(s)I(s)$$

avec : $\Delta C(s)$: variation de courbure à l'abscisse s

$\Delta M(s)$: variation de moment fléchissant à l'abscisse s

$I(s)$: inertie en flexion à l'abscisse s

En écrivant cette condition au niveau de chacun des n segments de l'axe, on obtient un système de n équations de la forme $E_i = \Delta M_i / (I_i \Delta C_i)$. Les valeurs de I_i , ΔC_i et ΔM_i sont déterminées par les mesures : la variation de moment est calculée en chaque point par différence entre le moment calculé dans l'état initial et celui calculé dans l'état final. Ce calcul implique les données de digitalisation et la distribution du chargement. L'inertie en chaque point est estimée à partir des données sur les dimensions transverses de l'axe. La variation de courbure est calculée en chaque point à partir des données de digitalisation dans l'état initial et dans l'état final. Les valeurs de E_i sont les n inconnues du problème. Elle peuvent être déterminées de façon unique à partir des n équations qui définissent l'équilibre.

Le calcul de courbure implique les dérivées secondes des coordonnées mesurées, et est donc très sensible aux erreurs de mesure de digitalisation. Pour avoir un résultat fiable, il est nécessaire de procéder à des ajustements locaux à partir de nombreux points de mesure. La méthode de dépouillement global présentée ci-dessous pallie à ces inconvénients, et permet d'obtenir un résultat robuste à partir d'un nombre limité de points de mesure.

3.3.5. Dépouillement global d'un essai

Si on considère que le module d'élasticité est homogène en tout point de l'axe, il n'est pas possible de calculer directement une valeur qui rende compte avec exactitude de la flexion observée. En effet,

pour les n équations qui définissent l'équilibre, nous n'avons qu'une inconnue à déterminer. Dans le cas général, il n'existe pas de solution qui satisfasse simultanément toutes les équations, c'est à dire qu'il n'existe pas de valeur d'élasticité permettant de simuler la flexion observée avec exactitude sous hypothèse d'homogénéité des propriétés matérielles à l'échelle de l'axe. On cherche alors à déterminer la valeur d'élasticité qui permet de s'approcher au plus près de l'équilibre.

La recherche numérique de la solution a été implémentée dans le programme *ModelMeca2.1* introduit dans la partie II. Celui-ci permet de déterminer la valeur d'élasticité qui minimise la distance entre la forme simulée et la forme mesurée à l'équilibre, en tenant compte de toute l'information disponible sur l'axe, et en grands déplacements. Cette valeur est qualifiée de « module de structure » de l'axe.

3.4. Essais de fluage sur axes entiers *in situ*

Pour l'ensemble de ce travail, nous nous sommes placés dans le cadre d'un comportement purement élastique des matériaux constitutifs des axes. On sait que, de façon plus générale, le bois a un comportement visco-élastique (KollMann et Côté 1968). Cela implique que, soumis à une sollicitation constante donnée, l'axe mis en charge commence par se déformer instantanément dans une certaine mesure, puis continue de se déformer au cours du temps. Le comportement élastique a donc, de façon générale, une composante instantanée et une composante différée. L'objectif des essais de fluage est d'évaluer l'importance de la composante différée. Ceci nous permettra de juger objectivement dans quelle mesure il est légitime de la négliger.

3.4.1. Dispositif expérimental

Le principe de ces essais est simple : il s'agit de réaliser un essai de flexion analogue à ceux présentés au paragraphe précédent, et de suivre l'évolution de la déformée au cours du temps, alors que la sollicitation est maintenue. Ce suivi de la déformée se fait en digitalisant l'axe de façon répétée après sa mise en charge.

3.4.2. Mise en œuvre des mesures

Nous avons réalisé ces essais durant l'hiver 1999/2000, afin de s'assurer que les mesures ne sont pas perturbées par les phénomènes de croissance, c'est à dire que la structure de l'axe et son chargement ne varient pas au cours du temps. Les essais ont été conduits sur trois axes d'un an par variété, analogues aux axes échantillonnés début 1999. La forme finale a été mesurée à 6 reprises : 10 minutes, 40 minutes, 3 heures, 24 heures, 5 jours et 32 jours après la mise en charge. Le module de structure apparent a été évalué à chaque date sous *ModelMeca2.1*.

3.4.3. Dépouillement des essais

Le comportement visco-élastique peut être pris en compte dans les modèles mécaniques sous forme d'une loi de variation temporelle du module d'élasticité apparent. La partie différée de la flexion est alors attribuée à une diminution du module d'élasticité apparent de l'axe au cours du temps (ce qui implique que, soumis à des sollicitations constantes, la déformation s'accroît au cours du temps). Diverses formes analytiques ont été proposées dans la littérature pour rendre compte de la loi de variation temporelle de l'élasticité (KollMann et Côté 1968). Nous avons choisi une loi de la forme :

$$E(t) = E(t_0) (1 + \alpha \log(t/t_0))$$

$E(t_0)$ représente le module d'élasticité instantané. Nous l'avons assimilé au module d'élasticité mesuré au bout de 10 minutes sous charge. Le paramètre α rend compte du degré de visco-élasticité du

matériau. Ce paramètre est nul pour un matériau purement élastique, négatif pour un matériau visco-élastique.

Pour déterminer la loi à partir des données d'un essai de fluage, il suffit de calculer le module de structure apparent entre l'état initial et l'état après mise en charge à chaque date où la forme a été mesurée. Les estimations aux différentes dates permettent d'estimer le paramètre α de la loi $E(t)$ par ajustement. Sa valeur est déterminée par une régression de $(E(t)-E(t_0))/E(t_0)$ en fonction de $\log(t/t_0)$, forcée à 0 à l'origine.

III-4. Mesure des déformations de maturation

4.1. Méthodes de mesure

➤ Principe des mesures de déformations résiduelles longitudinales

Différentes méthodes ont été mises au point pour mesurer l'état des déformations résiduelles à la périphérie d'axes ligneux sur pied. Pour une revue détaillée de ces méthodes, voir Baillères (1994) et Sassus (1998). Nous nous limitons pour notre étude à la mesure des déformations longitudinales, c'est à dire celles qui ont lieu dans le sens du fil du bois. En effet, ce sont ces déformations qui ont des conséquences sur la géométrie des axes et le port des arbres. Le principe des méthodes de mesure est de libérer localement les contraintes bloquées dans le bois. Pour cela, différents dispositifs ont été mis au point : perçage d'un trou unique, découpe d'un prisme de bois etc. On mesure alors la déformation qui se produit dans le matériau conséquemment à la découpe. Une modélisation mécanique permet de relier la déformation mesurée à l'état mécanique local du bois avant libération des contraintes, en tenant compte du dispositif expérimental et des propriétés du matériau.

La mesure nous donne accès à la valeur des déformations résiduelles longitudinales (DRL) dans les couches externes du bois. On admet classiquement (Fournier 1992) que cette valeur est très proche de la valeur des déformations longitudinales de maturation (DLM) si l'axe est suffisamment rigide. On parle alors de déformations résiduelle de maturation (DRLM), et la DRL mesurée est alors assimilée à la valeur de la DLM du bois sous-jacent à la mesure. Il convient dès maintenant de faire clairement la distinction entre deux problèmes liés à cette mesure. D'une part, il nous faut nous assurer que la mesure effectuée correspond bien à l'état mécanique local du matériau avant découpe, c'est-à-dire vérifier qu'on mesure les DRL de façon fiable. Ce problème est de nature essentiellement métrologique et dépend du dispositif expérimental utilisé. D'autre part, il nous faut relier cette mesure aux déformations de maturation, c'est-à-dire faire le lien entre DRL et DLM. Ce problème est indépendant de la technique de mesure et concerne l'interprétation de la mesure. Il fait appel à des considérations biomécaniques qui peuvent être spécifiques du matériel étudié.

Le premier problème a été l'objet de divers travaux, essentiellement établis dans le domaine forestier. Nous avons choisi d'utiliser la méthode des deux rainures, exposée ci-dessous, qui est réputée la plus fiable pour la mesure de retraits longitudinaux. Le second problème est ordinairement résolu par l'introduction de la notion de DRLM, en faisant appel à des hypothèses spécifiques sur lesquelles nous reviendrons lors de la discussion des résultats (IV-3.2).

➤ Méthode des deux rainures

Cette méthode consiste à mesurer la déformation conséquente au sciage de deux rainures de part et d'autre d'un capteur extensométrique fixé sur le bois. Le capteur que nous avons utilisé est un extensomètre à jauge relié à deux pointes métalliques distantes de 13.5 mm (figure 7). Ce capteur a été étalonné dans le mois précédant les mesures. Afin de mesurer l'état mécanique dans les couches périphériques du bois, l'axe est écorcé au niveau de la zone de mesure. La zone de mesure doit être choisie homogène (pas de nœud ou d'arrêt de croissance). Les pointes sont alors plantées dans le sens du fil du bois sur une profondeur de 2 mm. Ensuite, on scie une rainure à 5 mm des pointes de part et d'autre, perpendiculairement au fil du bois. Au fur et à mesure du sciage, les contraintes sont libérées et on enregistre un déplacement des pointes du capteur. Ce déplacement se stabilise à partir d'une certaine profondeur de trait de scie (3 à 4 mm). Avec cette méthode, il est possible de réaliser 20 à 30

à 30 mesures par heure. L'état de déformation longitudinale est donné par le rapport entre le déplacement final du capteur et la distance initiale entre les pointes.

4.2. Mesures mises en œuvre

Dans cette section, on présente trois séries de mesures réalisées en 1999 dans le but d'évaluer la valeur et la variabilité des déformations de maturation dans les couches périphériques du bois des axes d'abricotier. Toutes les mesures ont été réalisées au verger avec la méthode des deux rainures. Diverses sources de variabilité ont été étudiées :

- chaque série de mesure a été pratiquée sur les trois variétés étudiées.
- les séries correspondent à différents types d'axes, d'âge ou de diamètre distinct.
- dans les séries 1 et 2, les mesures ont été mises en œuvre sur des axes ayant différentes orientations (horizontale, oblique et verticale).
- dans toutes les séries, les mesures ont été faites à différentes abscisses de l'axe.
- à chaque fois, des mesures ont été faites en « couronnes », c'est à dire, pour une abscisse donnée, en différentes positions tangentielles de l'axe (dessus, dessous et sur les côtés).

➤ Série 1 : Mesures sur des axes dans leur seconde année de croissance

La première série de mesure a été pratiquée le 22/10/99. Les mesures portent sur 3 axes par variété équivalents à ceux de l'échantillon suivi, provenant du verger de Melgueil. L'objectif de cette série de mesure est de cerner les sources de variabilité des déformations résiduelles. Le diamètre moyen des axes au niveau des mesures est compris en 1.5 et 2.5 cm. Au moment des mesures, les axes portaient des nombreuses pousses courtes de l'année portant des feuilles. Pour chaque variété, on a choisi trois axes d'orientations variées : un vertical (inclinaison supérieure à 60°), un horizontal (inclinaison inférieure à 30°) et un oblique (inclinaison intermédiaire). Sur chaque axe, on a pratiqué une couronne de mesure dans la partie basale et une dans la partie médiane. A chaque couronne de mesure, trois mesures ont été faites : une en face supérieure de l'axe, une en face inférieure, et une latérale. Etant donné le diamètre des axes et la nature destructive des mesures, celles-ci n'ont pas été réalisées strictement en couronnes, mais ont été décalées de quelques centimètres.

➤ Série 2 : Mesures sur les axes de l'échantillon

La seconde série de mesure a été pratiquée sur certains axes de l'échantillon principal juste avant prélèvement, le 01/12/99. Afin de limiter au maximum les problèmes de fiabilité de la mesure, on a choisi les 5 axes de chaque variété qui avaient les plus gros diamètres. Le diamètre au niveau des points de mesure sont compris entre 2 et 3 cm. Au moment des mesures, les feuilles des arbres étaient tombées. Sur chaque axe, on a pratiqué deux couronnes de mesure à des abscisses différentes : une en position basale (5 à 10 cm de l'insertion) et une 30 cm plus loin. A chaque couronne, quatre mesures ont été faites à des positions tangentielles distinctes (face supérieure, face inférieure, côté droit et côté gauche). Là aussi, les mesures ont été décalées pour limiter les artefacts dus à l'aspect destructif de la mesure. D'autre part, les axes ont été classés en fonction de leur orientation, selon les mêmes critères que la série 1.

➤ Série 3 : Mesures sur des charpentières

La troisième série de mesure a été pratiquée le 09/11/99 sur des axes de plus gros diamètre. L'objectif de ces mesures est d'évaluer l'impact du diamètre sur les valeurs mesurées, et en particulier la sensibilité de la méthode à la rigidité de l'axe, qui augmente considérablement avec leur diamètre. Pour chaque variété, deux branches maîtresses âgés de 3 à 5 ans ont été sélectionnées. L'orientation de

ces axes est horizontale à oblique. Leur diamètre est compris entre 40 et 60 mm et ils avaient perdu une partie de leur feuillage au moment des mesures. Sur chaque branche, on a fait 4 à 5 couronnes de mesures espacées de 20 cm. Pour chaque couronne les mesures ont été faites dans les 4 positions tangentielles (face supérieure, inférieure, droite et gauche).

III-5. Etude anatomique

L'objectif de notre étude anatomique est de qualifier et quantifier les traits anatomiques qui jouent un rôle dans le redressement actif, c'est-à-dire le bois de tension (BT) et l'excentricité. On s'est pour cela basé sur l'analyse de sections transverses. Les méthodes d'observation, présentées au 5.1, ont été mises en œuvre pour identifier et délimiter les zones de BT et les cernes annuels. L'échantillon est présenté au 5.2.

5.1. Méthodes d'observation

Pour identifier les différents tissus qui constituent le bois d'abricotier, nous nous sommes basés sur l'observation de coupes transversales à deux échelles : les observations microscopiques ont permis d'identifier les différents types cellulaires et leur organisation au sein des sections ; les observations macroscopiques ont permis d'identifier et de délimiter les cernes annuels et les zones de BT en vue de leur quantification.

5.1.1. Observations microscopiques

La double coloration Safranine / Bleu Astra permet de distinguer, sur des coupes minces, les tissus lignifiés et les tissus riches en cellulose cristalline. La Safranine colore en rouge les zones riches en lignines, c'est à dire la plupart des parois cellulaires du bois. Le Bleu Astra s'accumule spécifiquement dans les zones de cellulose cristalline, telles que les couches G des parois du BT, qu'elles colorent en bleu.

Des coupes de 40 μm d'épaisseur ont été réalisées à l'aide d'un microtome à bois, après suppression de l'écorce. Le protocole utilisé pour les colorations est fourni en annexe 7. Enfin, les coupes ont été montées entre lame et lamelle dans du Pertex et observées à différents grossissements avec un microscope optique.

5.1.2. Observations macroscopiques

➤ Coloration sur bois massif

Pour distinguer les zones de BT des zones de bois normal à l'échelle de la section, on dispose d'une technique de coloration macroscopique connue de longue date (Jaccard 1919). Elle a été validée sur peuplier (Grzeskowiak, Sassus et Fournier 1996) et sur abricotier (Dumonceau 1995) par comparaison à des coupes microscopique. Cette technique est plus rapide à mettre en œuvre que les coupes microscopiques, en particulier sur des sections de grand diamètre. Le réactif utilisé est le chloro-iodure de zinc (ou réactif de Hertberg). Appliquée directement à l'aide d'un pinceau sur une section poncée d'un tronçon massif, il fait apparaître des zones foncées correspondant au BT.

J'ai testé cette méthode sur abricotier dans différentes conditions. Des tronçons de bois d'abricotier de taille et d'âge variés, provenant des trois variétés étudiées, secs ou humides, ont été soumis à ce colorant. La préparation du colorant a été réalisée suivant la méthode exposée par Grzeskowiak et al. (1996). Les résultats sont très variables : on a parfois obtenu une coloration nette de secteurs de BT, confirmée par comparaison avec les coupes minces. D'autres fois, la coloration a fait apparaître des zones foncées concentriques, correspondant au bois d'été, mais pas à des zones de BT. Sur d'autres essais, aucun contraste de coloration n'est apparu alors que la présence de BT a été attestée sur des coupes microscopiques appariées. La préparation du colorant a été réitérée à plusieurs reprises, sans changer ces résultats. Nous n'avons trouvé aucun facteur susceptible d'expliquer la variabilité des

résultats. Celle-ci peut être due à l'interaction entre le réactif et des composés chimiques spécifiques autres que la cellulose cristalline, ou à un effet de l'état de surface de la section. Aucune hypothèse n'a pu être confirmée. Nous avons finalement jugé que cette méthode d'observation n'était pas suffisamment fiable pour nos besoins.

➤ Observation directe sur bois sec

Sur des tronçons de gros diamètre conservés plusieurs mois au sec, et dont les sections ont été poncées, nous avons constaté la présence de zones contrastées plus sombres. Ces zones ont une forme de croissant caractéristique de la distribution du BT dans les cernes (voir figure 8). Après réhydratation des tronçons, des coupes minces ont été réalisées au niveau de ces zones et soumises à la coloration Safranine / Bleu Astra, qui a permis de confirmer qu'il s'agit bien de zones de BT. Il semble donc que le BT se colore spontanément lors du séchage des tronçons d'abricotier. Cette méthode d'observation est assez grossière, mais permet d'identifier et de quantifier la distribution des principaux secteurs de BT. Nous l'avons utilisée pour analyser les axes de l'essai d'arcure sur 'Modesto', qui sont d'un diamètre trop important pour réaliser des coupes minces de sections entières.

5.1.3. Cartographie des sections

Les sections observées à l'aide de l'une ou l'autre des méthodes ont été cartographiées. Nous avons procédé pour cela en plusieurs étapes :

- les sections ont été digitalisées à haute résolution à l'aide d'un scanner. Les tronçons massifs sont disposés sur le scanner et digitalisés directement. Les coupes minces sont elles aussi disposées sur le scanner, puis digitalisées par transmission, à l'aide d'un panneau lumineux.
- les images scannées ont été agrandies et imprimées, constituant le « fond de carte » de chaque section.
- les limites de la moelle, des cernes annuels et des zones de BT ont été identifiées soit directement à partir de l'image, soit par observation microscopique. Elles ont été reportées manuellement sur des calques à partir des images imprimées. Pour tenir compte de l'épaisseur du feutre, nous avons pris la convention de toujours placer le trait à l'intérieur de la limite de zone. La limite réelle des zones est donc constituée par le bord extérieur des traits.
- enfin, les calques ont été eux mêmes digitalisés avec un scanner, en vue de la quantification par analyse d'image.

Diverses précautions ont été prises pour maîtriser la résolution et l'échelle des images au cours des traitements, et pour que la direction haut/bas de l'image corresponde à la direction verticale qu'avait la section *in situ*. Au final, à chaque section est associée une image en mode binaire (noir et blanc) indiquant les différentes zones identifiées.

5.2. Mesures mises en œuvre

➤ Echantillon 'validation'

L'analyse anatomique de cet échantillon a pour objectif d'avoir une image précise de la distribution du BT dans les axes, qui puisse être mise en relation avec les autres données (soit pour la validation du modèle biomécanique, soit pour l'étude des causes de la formation de BT). Pour chaque axe, une section transverse a été analysée tous les 10 cm. Les coupes minces ont été réalisées avec l'aide d'un technicien pendant le printemps 2000 selon le protocole exposé au 5.1.1. Au total, 166 sections ont été analysées, chaque section étant repérée par son numéro d'axe et son abscisse (en cm depuis la base).

➤ **Autres axes de l'échantillon principal**

Pour chaque variété, 10 autres axes ont été choisis afin de compléter l'analyse et d'avoir un échantillon suffisant pour envisager la comparaison des variétés. Pour chaque axe, trois sections ont été analysées : une au milieu du tiers basal, une au milieu du tiers médian et une au milieu du tiers terminal. Les coupes minces ont été réalisées avec l'aide d'un technicien pendant l'été 2000 selon le protocole exposé au 5.1.1. En tout, 90 sections ont été analysées (3 variétés × 10 axes × 3 positions).

➤ **Essai d'arcure sur 'Modesto'**

Les axes de l'essai d'arcure mis en place sur la variété 'Modesto' en 1995 ont été analysés par les méthodes d'observation macroscopiques présentées au 5.1.2 (observation directe sur bois sec), à raison d'une section tous les 10 cm. L'objectif est de mettre en relation le traitement et la réaction anatomique. L'effectif des sections observées est 83 « fortes charges », 68 « faibles charges » et 210 « témoins ».

Les résultats relatifs à l'ensemble du suivi de croissance/flexion, à la mesure des propriétés mécaniques, aux déformations de résiduelles de maturation et à l'analyse anatomique sont présentés dans la partie IV.

Partie IV- Résultats : quantification des facteurs impliqués

Dans cette partie sont présentés les résultats « bruts » concernant l'ensemble des mesures réalisées, et leur analyse statistique. L'interprétation de ces résultats y est abordée pour certains points particuliers, mais est dans la mesure du possible différée à la partie VI. L'application de modèles mécaniques à partir de ces données sera présentée dans la partie V.

IV-1. Morphologie et dynamique de croissance/flexion

1.1. Méthodes d'analyse

1.1.1. Structuration des données et stratégie d'analyse

Les données brutes collectées sont de trois types : (1) les diamètres sont donnés par un réel, (2) les points de digitalisation sont des triplets de coordonnées et (3) les relevés d'axillaires sont à la fois une notation qualitative (le type d'axillaire) et un ou plusieurs réels définissant les attributs associés (diamètre, nombre de feuilles et/ou longueur). L'ensemble des données du suivi constitue une collection de ces données brutes, à plusieurs niveaux d'organisation : l'échantillon est constitué de nombreux axes, chaque axe a été mesuré à différentes dates, à chaque fois, les mesures ont été faites en différents abscisses. Pour chaque type de donnée, la mesure est donc fonction de trois paramètres : l'individu, la date et la position dans la pousse. La structure de ces données ne permet pas de leur appliquer directement une méthode d'analyse classique.

Pour analyser les données, nous allons « projeter » les mesures de façon à réduire le nombre de paramètres dont elles dépendent. Le première façon de réduire les données consiste à éliminer le paramètre 'position', en calculant des descripteurs globaux à l'échelle de l'axe. Les descripteurs qui ont été utilisés seront présentés dans les paragraphes 1.1.3 à 1.1.5. Ce sont des variables qui synthétisent l'information à l'échelle de l'axe (typiquement : la moyenne, la somme ou l'écart type des données locales). Les données sont alors, pour chaque individu, un ensemble de descripteurs qui dépendent du temps. Pour poursuivre l'analyse, nous adopterons deux types de démarche : soit éliminer le paramètre 'temps' et se concentrer sur la distribution des descripteurs au sein de l'échantillon (analyse 'statique'), soit éliminer le paramètre 'individus' et se concentrer sur l'évolution en fonction du temps de descripteurs qui synthétisent l'information à l'échelle de l'échantillon (analyse 'dynamique').

L'analyse 'statique' consiste à étudier la distribution des descripteurs, leurs éventuelles corrélations, et à comparer les sous échantillons. Cette analyse pourra amener à identifier de nouveaux sous échantillons homogènes, à discriminer les descripteurs pertinents ou à caractériser des relations entre descripteurs. Le paramètre 'temps' est éliminé en calculant chaque descripteur à une date donnée (ou leur variation entre deux dates données).

L'analyse 'dynamique' procède d'une démarche complémentaire. Elle consiste à étudier l'évolution des descripteurs en fonction du temps. Pour obtenir une information à l'échelle de l'échantillon, il faut calculer, à chaque date, des variables qui synthétisent la distribution des descripteurs entre les individus. Nous utiliserons toujours la moyenne, calculée sur différents sous échantillons. Le fractionnement en sous échantillons homogènes permet d'assurer la représentativité des évolutions moyennes établies. Cette analyse permettra de comparer les dynamiques de plusieurs variables ou de plusieurs échantillons, et d'identifier les dates des événements clés qui y sont associées. Les deux démarches sont indissociables : l'analyse 'statique' se base sur le calcul de descripteurs à des dates clés qui sont déterminées par l'étude de la dynamique ; l'analyse 'dynamique' n'est valide que si elle est pratiquée sur des sous échantillons suffisamment homogènes, qui sont identifiés lors de l'analyse 'statique'.

1.1.2. Automatisation des traitements : calcul de descripteurs et interpolations

Le nombre de points de mesure et les dates de mesure ne sont pas identiques pour tous les axes, ni pour toutes les mesures. Il en résulte des difficultés lors du calcul de l'évolution de descripteurs sur la saison (pour l'analyse 'dynamique') et lors de l'extraction des descripteurs aux dates clés (pour l'analyse 'statique'). Pour synchroniser les descripteurs, nous avons choisi d'interpoler à partir des données. On obtient ainsi des données sur tous les individus à toutes les dates, ce qui permet (1) de calculer la moyenne à chaque date pour établir les courbes d'évolution nécessaires à l'analyse 'dynamique', (2) d'évaluer les descripteurs relatifs à tous les individus à une date donnée pour l'analyse 'statique', même si certains individus ou certaines mesures n'ont pas été réalisées à cette date précise¹⁰.

La nécessité de mettre au point une méthode générale d'interpolation des données apparaît par ailleurs lors de l'extraction des données d'entrée des modèles mécaniques. En effet, le pas de discrétisation des mesures, dans l'espace et dans le temps, de chaque type de donnée, ne correspond pas *a priori* au schéma imposé par le modèle.

D'autre part, les données brutes représentent en tout à peu près 100000 données élémentaires (réel ou notation qualitative), à partir desquelles on se propose de calculer des descripteurs. La masse de données et la variété des descripteurs envisagés imposent d'automatiser les calculs. Pour réaliser les deux types de traitements évoqués (calcul de descripteurs à diverses échelles, interpolation des données dans l'espace et dans le temps), un programme nommé *BaseDo.exe* a été écrit en C++. Nous ne décrivons pas ici le détail de son implémentation. En voici les principales caractéristiques :

- les données d'entrée du programme sont des fichiers au format texte. Chaque fichier contient les données brutes relatives à un type de mesure, pour un axe donné, à une date donnée.
 - l'utilisateur précise quels descripteurs il veut extraire, pour quel(s) axe(s), à quelle(s) date(s) et à quelle échelle. On peut extraire soit des descripteurs à l'échelle de l'axe, soit des descripteurs locaux au pas de discrétisation désiré. Le résultat est fourni sous forme d'un fichier texte.
 - la structure du programme permet de définir la méthode d'interpolation associée à chaque type de mesure (géométrie, diamètre ou chargement) et chaque paramètre sur lequel on interpole (l'abscisse ou le temps).
 - toutes les interpolations se font à partir des données brutes, et non à partir des descripteurs eux-mêmes. Par exemple, l'évaluation de la moyenne de l'inertie à une date non observée se fait en 3 temps : (1) interpolation point par point du diamètre local à partir des mesures faites aux dates les plus proches, (2) calcul point par point de l'inertie locale, (3) calcul final du descripteur de l'axe.
 - pour les mesures qui varient continuellement en fonction d'un paramètre (comme le diamètre en fonction de l'abscisse ou du temps) l'interpolation est linéaire entre les deux points de mesure les plus proches. Si on connaît la valeur de la variable X à deux points p_0 et p_1 :
- $$X(p) = ((p-p_0)X(p_0) + (p_1-p)X(p_1)) / (p_1-p_0) \quad \text{avec } p_0 \leq p < p_1$$
- des méthodes spécifiques d'interpolation permettent de tenir compte des mesures qui ne varient pas de façon continue, telles que les charges axillaires.

¹⁰ L'alternative à ce choix est de négliger les différences entre les dates de mesure et d'assimiler la valeur à une date donnée à la valeur mesurée à la date la plus proche (ou la plus pertinente). Ceci revient à appliquer une méthode interpolation « constante » (en escalier). La méthode d'interpolation utilisée ici fournit des valeurs distinctes à toutes les dates. Il faut cependant garder à l'esprit que les mesures ont été faites avec une périodicité de l'ordre de 2 à 3 semaines. Par conséquent, si on observe des décalages entre phénomènes de l'ordre d'une ou deux semaines, ceux-ci peuvent être dus à des artefacts.

Pour l'analyse, tous les descripteurs ont été calculés pour tous les axes à chaque semaine de l'année. On a alors un jeu de données qui dépendent des individus et des dates. Les données relatives aux deux types d'analyse en sont alors extraites.

1.1.3. Proposition de descripteurs de la morphologie

Le calcul des descripteurs a été fait en deux temps : passage de l'information brute à une information locale traduite sous forme de descripteurs locaux, puis passage à l'échelle de l'axe. De nombreux descripteurs seront proposés pour caractériser l'axe dans les paragraphes 1.1.3, 1.1.4 et 1.1.5. En prémisses à l'analyse des données (1.2.1), ces descripteurs seront comparés afin de ne garder que ceux qui contiennent l'information la plus intéressante. Les définitions de tous les descripteurs utilisés dans cette partie sont rassemblées en annexe 11.

➤ Description locale

A l'échelle du segment, la morphologie est décrite par la longueur du segment (fixe dans ce cas) et ses diamètres à la base et au sommet. Dans le cas où deux mesures ont été faites à chaque point de mesure (dans les directions verticale et horizontale), la forme de la section a été décrite localement par l'indice de méplat, donné par $(D_V/D_H)-1$ et exprimé en % (Bouillet 1993; Pruyn, Ewers et Telewski 2000). Cet indice indique dans quelle mesure le diamètre vertical est supérieur au diamètre horizontal. D'un point de vue mécanique, les propriétés locales liées à la morphologie transverse de l'axe sont décrites par l'aire de la section ($\pi D^2/4$) et son inertie en flexion ($\pi D^4/64$).

➤ Description à l'échelle de l'axe

Dans sa direction longitudinale, la morphologie d'un axe a été caractérisée par :

LONG : longueur totale de l'axe

NBEN : nombre d'entrenœuds de l'axe

LGEM = LONG / NBEN : longueur moyenne des entrenœuds

Différents descripteurs peuvent être proposés pour caractériser la morphologie transverse à l'échelle de l'axe. Huit descripteurs ont été calculés :

DBAS : diamètre à la base de l'axe = moyenne des mesures sur les 10 premiers centimètres (incluant les points supplémentaires à ce niveau)

DMID : diamètre au milieu de l'axe = diamètre du segment médian

DTOP : diamètre au sommet de l'axe = diamètre du segment terminal

DMOY : diamètre moyen = moyenne des diamètres de tous les segments

SMOY : surface de section équivalente au diamètre moyen = $\pi \text{DMOY}^2 / 4$

MOYS : surface moyenne = moyenne des surfaces de toutes les sections

IMOY : inertie équivalente au diamètre moyen = $\pi \text{DMOY}^4 / 64$

MOYI : inertie moyenne = moyenne des inerties de toutes les sections

La surface et l'inertie sont caractérisées chacune par deux descripteurs qui traduisent la valeur moyenne, mais qui ne sont pas mathématiquement égaux.

Enfin, pour caractériser la forme des sections d'un axe, nous utiliserons le méplat moyen (**MEPL**), calculé comme la moyenne des indices de méplat de chaque point de l'axe.

Les dimensions transverses ne peuvent pas être complètement dissociées de la longueur de l'axe. Il est en effet évident que ces deux descripteurs sont liés à la taille de l'axe. Afin de comparer les

morphologies d'axes de longueurs différentes, il est commode de disposer de descripteurs qui tiennent compte de ce fait. Différents descripteurs peuvent être envisagés pour cela en combinant les données sur les dimensions transverses et celles sur la longueur. Ces descripteurs traduisent deux concepts distincts : l'*élancement*, qui traduit le rapport entre les dimensions longitudinales et transverse de l'axe, et le *défilement*, qui traduit l'évolution des dimensions transverses le long de l'axe. Nous avons choisi pour cela les descripteurs suivants :

ELAN : rapport d'élancement = LONG/DMOY

CONI : conicité, ou décroissance métrique moyenne du diamètre = (DBAS-DTOP) / LONG

Ces deux descripteurs sont sans dimension (ils seront respectivement exprimés en m/m et en mm/m). Ils expriment tous deux les proportions d'un axe, indépendamment de son échelle. Il est cependant important de distinguer clairement les deux notions qu'ils recouvrent. La notion d'élancement est, dans sa définition, indépendante des variations longitudinales de diamètre. Elle ne dépend que de la valeur globale du diamètre (traduite ici par le diamètre moyen) et de sa longueur totale. Les axes A et B schématisés sur la figure 1 ont le même élancement, mais des conicités différentes. Par contre, la conicité telle qu'on l'a définie ne dépend que des variations longitudinales de diamètre. Elle est indépendante de la valeur moyenne de ce diamètre. Les axes B, C et D schématisés figure 1 ont tous trois la même valeur de conicité, mais des élancements différents. Ces cas se distinguent en particulier par la valeur de leur diamètre au sommet. Un autre descripteur de la conicité est fréquemment utilisé (Leiser et Kemper 1973; Cannell et Morgan 1987). Il correspond à la formule : (DBAS-DTOP) / (DTOP*LONG). Nous n'avons pas fait ce choix car le descripteur n'est pas adimensionné.

On envisage par ailleurs le volume total de l'axe, calculé comme la somme des volumes de chaque segment. Ce descripteur est égal au produit de la section moyenne par la longueur.

VOLU : volume total de l'axe = MOYS*LONG

1.1.4. Proposition de descripteurs de la géométrie

➤ Description locale

Les données nous fournissent une description locale de la position des points de l'axe dans l'espace. Ces données peuvent être dérivées pour obtenir des informations plus synthétiques, telle que l'inclinaison, le rayon de courbure ou le rayon de torsion local.

Les descripteurs locaux que nous avons choisis sont l'inclinaison locale et la courbure locale, calculés directement à partir des coordonnées des points. Si $P_i = (X_i, Z_i)$ et $P_{i+1} = (X_{i+1}, Z_{i+1})$ sont deux points, l'inclinaison locale I_{i+1} du segment qui les joint vaut :

$$I_{i+1} = \arcsin (H_{i+1}/L_{i+1}) \quad \text{avec} \quad H_{i+1} = Z_{i+1} - Z_i$$

$$L_{i+1} = ((X_{i+1} - X_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2)^{1/2}$$

L'inclinaison sera exprimée en degrés par rapport à l'horizontale.

La courbure est définie comme la variation linéique de l'inclinaison locale. On peut l'exprimer en un point relativement à l'inclinaison des segments de part et d'autre de ce point. Si P_{i-1} , P_i et P_{i+1} sont trois points consécutifs, la courbure C_i au niveau de P_i est estimée par la formule suivante :

$$C_i = 2(I_{i+1} - I_i) / (L_{i+1} + L_i)$$

➤ Description à l'échelle de l'axe

Différents descripteurs de la géométrie globale d'un axe peuvent être calculés à partir des coordonnées de ses points. Deux critères ont été pris en compte dans le choix des descripteurs :

- les descripteurs doivent avoir une signification claire, de sorte que leur valeur puisse être interprétée intuitivement.
- les descripteurs doivent être adimensionnés (c'est-à-dire indépendants de l'échelle), de sorte qu'ils aient la même valeur pour des axes ayant la même forme mais des dimensions différentes.

Six descripteurs ont été calculés en combinant des mesures de longueur et d'angle (les angles sont toujours exprimés en degrés par rapport à la direction horizontale) :

INCB : inclinaison de la base = inclinaison moyenne sur les 10 premiers centimètres (estimée à partir des points de mesure supplémentaires sur le segment basal)

INCC : inclinaison de la corde = inclinaison de la ligne joignant la base et l'apex

INCM : inclinaison moyenne = moyenne des inclinaisons de tous les segments

CTOT : courbure totale = intégrale de la courbure locale le long de l'axe. Ce descripteur est aussi égal à la différence d'inclinaison entre la base et l'apex, et au produit de la courbure moyenne par la longueur¹¹. Elle est positive si l'axe est globalement courbé vers le haut, négative s'il est globalement courbé vers le bas. Par contre, elle peut être nulle sans que l'axe soit rectiligne (s'il présente un changement de courbure).

RECT : indice de rectitude = rapport entre la longueur de la corde et la longueur de l'axe, compris entre 0 et 1. Il vaut 1 pour un axe parfaitement rectiligne.

IVAP : indice de verticalité de l'apex = rapport entre la hauteur de l'apex (par rapport à la base) et la longueur de l'axe. Il est compris entre -1 et 1. Il vaut 1 pour un axe droit et vertical, 0 si l'apex est à la même hauteur que la base, et est négatif si l'apex est plus bas que la base (ce descripteur combine les notions d'inclinaison et de rectitude).

Ces deux derniers indices sont sans dimension.

1.1.5. Proposition de descripteurs du chargement

➤ Description locale

Les données de base sont, pour chaque axillaire, son type morphologique (fruit, pousse courte ou longue) et sa masse (calculée à partir de relations d'allométrie). Elle sont définies ponctuellement au niveau de chaque entrenœud. Deux autres descripteurs locaux en dérivent :

- la charge totale du segment porteur, calculée comme la somme des masses des organes qu'il porte (exprimée en g).
- la masse linéique de charge, que nous calculons pour chaque segment comme le rapport entre sa charge totale et sa longueur (exprimée en g/m).

Notons qu'il existe une différence de nature entre les données de charges ponctuelles et les autres données locales (diamètre, inertie, inclinaison, courbure ou masse linéique locales). Ces dernières sont des variables définies en tout abscisse de l'axe. Ce n'est pas le cas des charges ponctuelles : elles ne sont définies qu'en un nombre fini d'abscisses de l'axe. Il en résulte que certaines opérations, qui sont naturelles pour les variables définies de façon continue, n'ont pas de sens sur cette variable¹². Par

¹¹ notons que la courbure moyenne n'est pas un descripteur adimensionné (on l'exprime en m^{-1}) : deux axes de forme analogue mais de dimensions différentes ont des courbures moyennes différentes. C'est pourquoi ce descripteur n'a pas été utilisé.

¹² Par exemple : la moyenne des charges ponctuelles n'a pas une signification équivalente à la moyenne des diamètres ; le fait d'interpoler entre deux charges ponctuelles n'a pas de sens ; pour décrire la distribution des charges dans l'axe, on ne peut pas utiliser directement une régression des masses ponctuelles en fonction de l'abscisse...

contre, la masse linéique est une variable définie partout, qui peut être traitée d'une façon analogue aux autres variables.

➤ Description à l'échelle de l'axe

Le nombre total d'axillaires de chaque type (court, long, fruit) a été dénombré pour chaque axe. Ces descripteurs permettent en particulier de repérer les axes pour lesquels un type est absent (axes sans fruit ou sans pousse longue). Divisés par le nombre total de nœuds, ils permettent d'estimer la fréquence des différents types de pousses. Nous utiliserons les descripteurs suivants :

NBEN : Nombre d'entrenœuds

NBRC : Nombre de pousses courtes

NBRL : Nombre de pousses longues

NBFR : Nombre de fruits

NBVG : Nombre total de pousses = NBRC + NBRL

N%VG : Pourcentage de nœuds ayant donné une pousse végétative = NBVG / NBEN

N%RL : Pourcentage de pousses qui se sont développées en pousses longues
= NBRL / NBVG

En outre, deux descripteurs qualitatifs seront utilisés pour identifier des sous échantillons homogènes :

RL? : Présence (1) ou absence (0) de pousse longue sur l'axe = (NBRL > 0)

FR? : Présence (1) ou absence (0) de fruit sur l'axe = (NBFR > 0)

La charge totale de l'axe est calculée comme la somme des masses des axillaires. On peut la décomposer en fonction de la nature des axillaires. Nous avons ainsi distingué la charge totale en fruits, en pousses courtes et en pousses longues, dont la somme est la charge totale de l'axe. La fraction massique de chaque type en est directement déduite. Nous avons de plus calculé la masse du prolongement, indépendamment du fait qu'il soit long ou court. Les descripteurs utilisés sont les suivants :

MFR : Masse totale des fruits

MRC : Masse totale des pousses longues

MRL : Masse totale des pousses courtes

MPR : Masse totale du prolongement

MVG : Masse totale des pousses = MRC + MRL

MTOT : Masse totale des charges = MFR + MVG

M%FR : Fraction massique des fruits = MFR / MTOT

M%VG : Fraction massique des pousses = MVG / MTOT = 1 - M%FR

M%RC : Fraction massique des pousses courtes parmi les pousses = MRC / MVG

M%RL : Fraction massique des pousses longues parmi les pousses = MRL / MVG = 1 - M%RC

M%PR : Fraction massique du prolongement parmi les pousses = MPR / MVG

De nombreux descripteurs peuvent être imaginés pour décrire la distribution des charges le long de l'axe. La forme de la distribution longitudinale des charges est très variable entre les axes, selon la position des fruits et des éventuelles pousses longues. Il semble peu réaliste de chercher une forme analytique à peu de paramètres qui rende correctement compte de la variété de distributions qui

existent (notons qu'une approche différente, développée au CIRAD-amap, permet de modéliser la distribution de la ramification avec un modèle parcimonieux en paramètres (Guédon et Costes 1999). Ce modèle, stochastique, ne peut cependant pas être utilisé directement dans notre cadre d'application). Nous avons préféré utiliser un descripteur qui ne fasse pas d'hypothèse sur la forme de la distribution : le centre de gravité des charges. Celui-ci est calculé comme la moyenne des abscisses des charges ponctuelles, pondérée par leurs masses respectives. Afin de pouvoir comparer la distribution des charges au sein d'axes de longueurs différentes, la position du centre de gravité est rapporté à la longueur de l'axe et exprimée entre 0 (charge concentrée à la base) et 1 (charge concentrée à l'extrémité). Notons que ce descripteur ne permet pas de distinguer le cas d'une distribution homogène des charges de long de l'axe et celui d'un chargement concentré au milieu de l'axe (tous deux correspondent à un centre de gravité situé à 0.5). Son utilisation doit donc être complétée par une observation de la distribution des charges à l'échelle locale.

Les descripteurs retenus sont finalement :

PFR : Position relative du centre de gravité des fruits

PVG : Position relative du centre de gravité des pousses

PTOT : Position relative du centre de gravité des charges = $M_{FR} \times PFR + M_{VG} \times PVG$

1.1.6. Présentation des résultats

Les résultats sont présentés dans les sections 1.2 à 1.5 de ce chapitre. On s'attachera tout d'abord (1.2) à analyser la morphologie et la géométrie initiale par une analyse de type 'statique'. La croissance et la flexion des axes sur la saison seront présentées dans les sections 1.3, 1.4 et 1.5. Tous les traitements statistiques présentés ont été effectués sous le logiciel STATISTICA®.

➤ Analyse de la morphologie et de la géométrie initiale

En premier lieu, on procédera à une analyse de la redondance entre les descripteurs envisagés, afin de choisir les plus pertinents. On analysera ensuite chaque descripteur indépendamment. Si nécessaire, on reviendra à l'échelle locale pour vérifier que les descripteurs calculés à l'échelle de l'axe résument de façon satisfaisante les variations locales. La distribution du descripteur sera ensuite étudiée pour chaque variété. La normalité des distributions sera appréciée par un test du Chi² au seuil de 5%. Dans le cas où la variable est normale, on fournira, en plus de la moyenne, l'intervalle de confiance normal au seuil de 5%. Les distributions seront comparées par un test de Student (au seuil de 5%) si elles sont normales, un test non paramétrique de Mann-Whitney (au seuil de 5%) sinon. Dans le cas où le test de normalité est en limite de signification, les deux tests seront effectués et la différence sera considérée significative si les deux tests sont d'accord. Après avoir caractérisé chaque variable indépendamment, on s'intéressera à leur distribution conjointe. On notera les corrélations significatives intéressantes entre variables au sein de chaque variété. Les coefficients de corrélation calculés sont toujours des coefficients de corrélations linéaires (de Pearson). Contrairement à l'analyse de la redondance, il ne s'agit pas de choisir entre des descripteurs véhiculant une information similaire (et donc très fortement corrélés quelque soit l'échantillon sur lequel on se base), mais de détecter des liens entre variables décrivant des phénomènes distincts, dans le but de les interpréter en terme d'optimalité mécanique ou de résultat de la première année de croissance. Enfin, les variétés seront comparées globalement pour en extraire les traits les plus caractéristiques.

➤ Analyse de la croissance et de la flexion

Les résultats sont présentés dans trois paragraphes, se centrant chacun sur un type de donnée : l'évolution des productions axillaires (1.3), de la morphologie (1.4) et de la géométrie (1.5). Chacun comporte notamment :

- une quantification des descripteurs et de leur évolution sur la saison, basée sur des analyses 'statiques' et 'dynamiques'.
- une mise en relation entre le phénomène étudié et ceux qui ont été étudiés précédemment : en 1.3, on regardera le lien entre la croissance des axillaires, la morphologie et la géométrie initiale ; en 1.4 on étudiera le lien entre la croissance en diamètre et la croissance primaire ; en 1.5 on s'intéressera aux corrélations entre l'évolution de la géométrie et les deux processus de croissance. On se contentera de repérer et de quantifier les relations qui semblent intéressantes ; leur interprétation en terme d'architecture et de mécanique est différée à la partie VI.
- une caractérisation finale des variétés, mettant en relief les principales différences observées.

Les méthodes statistiques utilisées sont identiques à celles utilisées pour l'analyse de la morphologie et de la géométrie initiale. Nous conserverons les codes introduits pour nommer les descripteurs, en précisant la date à laquelle ils se réfèrent. La date sera codée par un numéro simple :

- 0 : début de saison (avant débourrement)
- 1 : date intermédiaire (dont précisera ultérieurement le sens)
- 2 : maturité des fruits (avant récolte)
- 3 : juste après récolte
- 4 : fin de saison (avant la chute des feuilles)
- 5 : fin de saison (après la chute des feuilles)

Par exemple, le code INCM2 désigne l'inclinaison moyenne avant récolte. On étudiera de plus la variation des descripteurs entre deux dates, qui sera codée en accolant les numéros correspondant aux deux dates. Ainsi, INCM23 désigne la variation d'inclinaison moyenne entre les dates 2 et 3, ce qui quantifie le redressement de l'axe à la récolte des fruits ($INCM23 = INCM3 - INCM2$).

1.2. Morphologie et géométrie initiale

1.2.1. Analyse de la redondance : choix des descripteurs pertinents

Pour analyser la redondance des descripteurs que nous avons définis, nous nous sommes basés sur l'étude de leurs corrélations. Pour chaque groupe de descripteurs (morphologie et géométrie), on a calculé la matrice des corrélations sur l'ensemble des individus mesurés. On considère que des descripteurs sont redondants s'ils sont très fortement corrélés ($R > 0.95$). Parmi un groupe de descripteurs bien corrélés, nous conserverons le plus représentatif (c'est-à-dire celui qui est le mieux corrélé à l'ensemble des autres descripteurs).

➤ Descripteurs de morphologie

Le tableau 1 montre la matrice des corrélations des descripteurs de morphologie transverse. On y voit nettement apparaître un groupe de descripteurs intimement corrélés : DMOY, DBAS, DMID, SMOY et MOYS. Les corrélations entre tous ces descripteurs sont supérieures à 0.95 (la figure 2 illustre en particulier la corrélation entre DMOY et DBAS). DMOY est le descripteur qui est le mieux corrélé à tous les autres, c'est donc celui que nous conserverons pour représenter ce groupe.

Les deux descripteurs de l'inertie (IMOY et MOYI) présentent une corrélation de 0.95. Notons que les méthodes de calcul de l'inertie moyenne de l'axe ne sont pas pour autant équivalentes, puisque, pour un axe donné, MOYI a en moyenne une valeur plus de deux fois supérieure à IMOY (voir figure 3). Du fait de la méthode employée pour son calcul, MOYI donne plus d'importance aux valeurs fortes de diamètre locale (diamètre à la base) que IMOY. Entre ces deux descripteurs, IMOY est le mieux corrélé à DMOY. En conséquence, nous conserverons MOYI qui est moins redondant.

Les descripteurs conservés sont finalement DMOY, MOYI et DTOY. A ces descripteurs s'ajoutent MEPL, qui caractérise la forme des sections et LONG, LGEN, ELAN, CONI, VOLU qui intègrent les composantes longitudinales de la morphologie.

➤ **Descripteurs de géométrie**

Le tableau 2 montre la matrice des corrélations des descripteurs de géométrie. Les descripteurs INCC, INCM et IVAP présentent entre eux des corrélations supérieures à 0.98 (on note en particulier l'excellente concordance entre l'inclinaison moyenne et l'inclinaison de la corde, illustrée sur la figure 4). Au sein de ce groupe, le descripteur le mieux corrélé aux autres est INCM, que nous conservons. Les autres descripteurs ne présentent pas de corrélations fortes entre eux et sont tous conservés.

Les descripteurs conservés sont finalement INCB, INCM, CTOT et RECT.

1.2.2. Distribution des descripteurs

Le tableau 3 rassemble l'essentiel des informations pour tous les descripteurs pour les trois variétés : moyennes, écart types, normalité et comparaison des distributions.

➤ **Longueur (LONG)**

Les longueurs des axes varient entre 0.64 m et 1.97 m pour tout l'échantillon. La figure 5 montre l'histogramme de distribution des longueurs. 'Palsteyn' et 'Modesto' ont des distributions de forme similaire, étalée à droite. Le coefficient de variation de la distribution de 'Lambertin' est supérieur à celui des autres variétés (0.31 contre 0.21 et 0.21). Sa distribution est bimodale. Par comparaison aux autres variétés, il comporte une plus grande proportion d'axes de faible longueur (<1m). Un second pic apparaît au niveau de valeurs fortes (>1.6 m), qui isole un sous échantillon de 6 axes (individus L09, L21, L30, L36, L39 et L40). Le test de Mann-Whitney indique que 'Lambertin' a une distribution qui diffère significativement de celle de 'Palsteyn', mais pas de celle de 'Modesto'. Il ne met pas en évidence de différence significative entre la distribution de 'Modesto' et 'Palsteyn'.

➤ **Longueur des entrenœuds (LGEN)**

La figure 6 montre la distribution des longueurs moyennes des entrenœuds des axes. Soulignons qu'il ne s'agit pas de l'histogramme des longueurs d'entrenœuds sur l'ensemble des nœuds des axes, mais bien de l'histogramme des longueurs moyennes d'entrenœuds par axe, ce qui explique la faible variance des distributions et leur normalité. On voit notamment que 'Modesto' a des entrenœuds significativement plus courts que ceux des autres variétés. Les longueurs d'entrenœuds de 'Lambertin' et 'Palsteyn' ont des distributions similaires.

➤ **Diamètre moyen (DMOY)**

La figure 7 représente la distribution des diamètres moyens pour les trois variétés. Sur l'ensemble des variétés, les valeurs sont comprises entre 3.2 et 10.6 mm. Les distributions ont des formes similaires : toutes sont étalées vers la droite. 'Lambertin' a un diamètre moyen significativement supérieur à celui

des autres variétés. Palsteyn a le coefficient de variation le plus élevé (0.24 contre 0.15 pour 'Modesto' et 0.17 pour 'Lambertin').

➤ **Diamètre de l'extrémité (DTOP)**

La figure 8 montre l'histogramme de distribution des diamètres à l'extrémité. Ceux-ci varient entre 1.5 et 4.5 mm pour 'Modesto' et 'Palsteyn', entre 2.5 et 6.5 mm pour 'Lambertin'. Les coefficients de variation sont comparables entre les variétés. 'Lambertin' a des diamètres à l'extrémité significativement plus élevés que les deux autres variétés, qui ne diffèrent pas significativement entre elles.

➤ **Inertie moyenne (MOYI)**

La distribution des moyennes d'inertie est représentée sur la figure 9. Les variations d'inertie entre axes sont de grande ampleur : les valeurs s'étalent entre 10 et 1800 mm⁴. Les distributions présentent toutes un mode sur des valeurs de l'ordre de 100 mm⁴, et sont très étalées vers la droite. Le logarithme de cette variable se distribue de façon normale. 'Lambertin' a une inertie significativement plus élevée que les autres variétés. 'Palsteyn' a un coefficient de variation nettement plus élevé que les autres variétés (1.19 contre 0.70 pour 'Lambertin' et 0.60 pour 'Modesto').

➤ **Indice de méplat (MEPL)**

Sur l'ensemble des mesures locales, l'indice de méplat est toujours compris entre -20% et +20%. L'observation des valeurs de méplat en fonction de la position dans l'axe ne met en évidence aucune tendance chez aucune des variétés, comme l'illustre la figure 10. D_V est en moyenne supérieur à D_H de 2% pour 'Palsteyn' et 'Lambertin', de 1% pour 'Modesto'. La forme des sections diffère significativement d'un cercle pour les trois variétés. Si on assimile les sections à des ellipses dont l'axe est orienté selon la pesanteur, les variétés 'Palsteyn' et 'Lambertin' ont des sections significativement plus elliptiques que 'Modesto'. L'aplatissement des ellipses reste cependant très faible pour les trois variétés.

La différence entre les diamètres pris dans les deux directions perpendiculaires, bien que significative, n'est que de 1 à 2 %. Les conséquences mécaniques, en terme de gain d'inertie en flexion, sont mathématiquement égales à cette valeur, comme nous l'avons établi en annexe 2. Nous négligerons donc systématiquement ce méplat, en considérant que la section peut sans conséquences être assimilée à une section circulaire.

➤ **Rapport d'élanement (ELAN)**

Les rapports d'élanement sont compris entre 98 et 264 pour l'ensemble des axes. La figure 11 montre l'histogramme des rapports d'élanement pour les trois variétés. Les moyennes sont significativement différentes entre variétés : 'Palsteyn' a clairement des axes élancés et 'Lambertin' des axes trapus en moyenne (ce qui est directement relié au fait que cette variété a à la fois la longueur la plus faible et le diamètre le plus important) ; les axes de 'Modesto' sont intermédiaires. 'Lambertin' a un coefficient de variation supérieur aux autres variétés. La distribution des valeurs fait apparaître deux sous échantillons chez 'Lambertin'. Le premier sous échantillon est centré sur des valeurs basses (autour de 130 m/m) et le second autour de valeurs plus élevées (180 m/m), intermédiaires entre les élanements moyens de 'Palsteyn' et 'Modesto'. Ce sous échantillon contient tous les axes les plus longs de cette variété, repérés lors de l'analyse de la distribution des longueurs, et un certain nombre d'axes plus courts et fins. On reviendra sur ce point lors de l'analyse conjointe des descripteurs de morphologie.

➤ **Conicité (CONI)**

L'observation individuelle de la décroissance du diamètre le long des axes fait apparaître deux zones distinctes. Dans sa partie la plus basale, le diamètre décroît rapidement selon une courbe convexe. Au delà de cette partie, la décroissance du diamètre est relativement constante. La figure 13 illustre ce fait pour un axe typique de chaque variété. En dehors de la partie basale, l'évolution du diamètre est donc très bien décrite par une loi linéaire : $D(s) = D_0 - Ks$, où D_0 désigne le diamètre à la base de la zone et K la conicité.

Sur l'ensemble de l'échantillon, la conicité est comprise entre 3.3 mm/m et 8.3 mm/m. La figure 12 illustre la distribution de ce descripteur pour les trois variétés. Les distributions ne diffèrent pas significativement entre variétés.

➤ **Volume (VOLU)**

Le volume des axes s'étend entre 7 et 192 cm³. La figure 14 montre les distributions pour les trois variétés. Les distributions sont toutes étalées à droite. La différence entre les distributions n'est pas statistiquement significative. 'Modesto' a un volume moyen inférieur, principalement à cause de l'absence d'axe de gros volume (aucun axe n'a un volume supérieur à 100 cm³). Le coefficient de variation du volume est important pour 'Lambertin' et 'Palsteyn' (respectivement 0.60 et 0.74), et moindre pour 'Modesto' (0.47).

➤ **Inclinaison moyenne (INCM)**

Pour l'ensemble des axes, on trouve des inclinaisons moyennes qui varient entre -5° et 80°. La figure 15 montre l'histogramme de la distribution des inclinaisons moyennes. Au sein même de chaque variété, les inclinaisons moyennes sont très variables : pour les trois variétés, les valeurs maximales sont situées autour de 75-80° ; les valeurs minimales sont -5° pour 'Palsteyn', 10° pour 'Lambertin' et 25° pour 'Modesto'. 'Palsteyn' a une inclinaison en moyenne significativement moins élevée que les autres variétés. Cette variété présente aussi la plus forte variabilité de l'inclinaison moyenne. 'Modesto' a les axes en moyenne les plus dressés, bien que la différence avec 'Lambertin' ne soit pas statistiquement significative.

➤ **Inclinaison de la base (INCB)**

La figure 16 représente la distribution des inclinaisons à la base pour les trois variétés. Les inclinaisons à la base s'étendent entre -15° et 80° pour 'Modesto' et 'Palsteyn', entre 10 et 80° pour 'Lambertin'. Les distributions ne diffèrent pas significativement entre variétés. On note que, contrairement aux autres variétés, aucun axe de 'Lambertin' ne présente de valeur négative pour ce descripteur. Palsteyn présente la plus forte variabilité de valeurs.

➤ **Courbure totale (CTOT)**

Les figures 19abc montrent la géométrie des axes de l'échantillon 'validation' de chaque variété. On voit que la courbure n'est pas constante le long des axes, et que certains axes présentent des changements de courbure. Il est donc important de ne pas interpréter directement une courbure nulle comme l'indicateur d'un axe droit (cela n'est vrai que si, de plus, la rectitude est proche de 1). Les changements de courbure sont cependant de faible amplitude et la courbure totale reste un bon indicateur de l'allure générale des axes : le signe indique s'ils sont globalement courbés vers le haut ou vers le bas. Le maximum de courbure est le plus souvent situé vers le milieu de l'axe, parfois vers sa base, mais jamais dans sa partie distale.

La figure 17 montre les histogrammes de distribution de la courbure totale des axes. Les courbures totales sont comprises entre -35° et 45°. 'Palsteyn' présente la plus forte variabilité. 'Modesto' a une

Figure 19 a :

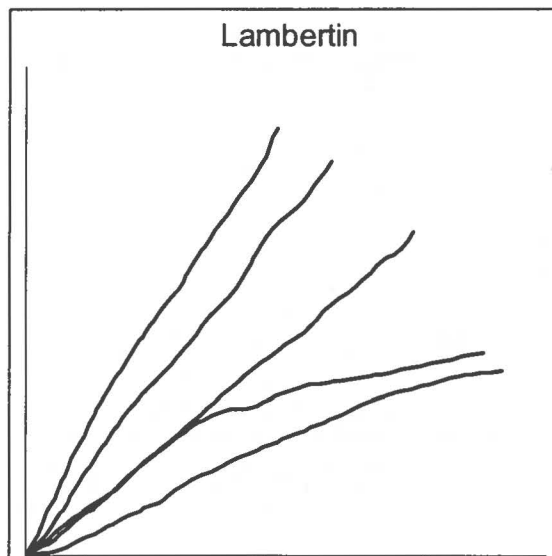


Figure 19 b :

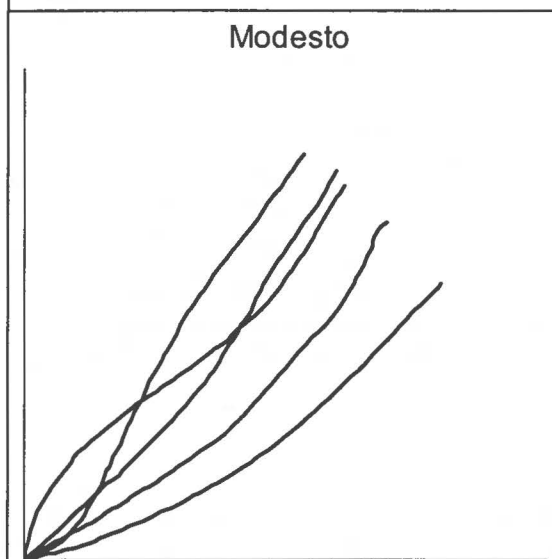


Figure 19 c :

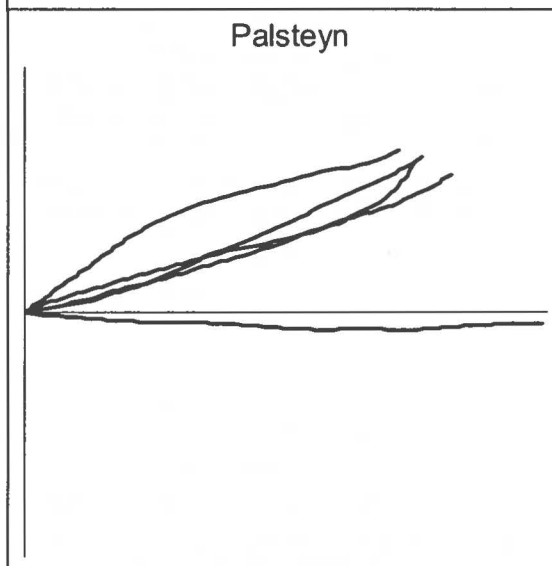


Figure 19abc : forme initiale des axes du sous-échantillon 'validation'.

courbure totale significativement plus élevée que celle des autres variétés : 80% de ses axes sont courbés vers le haut, alors que seulement 63% de ceux de 'Lambertin' et 47% de ceux de 'Palsteyn' le sont.

➤ **Rectitude (RECT)**

La figure 18 montre l'histogramme des rectitudes pour les trois variétés. Les valeurs de ce descripteur sont comprises entre 0.83 et 1 sur l'ensemble de l'échantillon. La distribution des rectitudes chez 'Lambertin' est différente de celle des autres variétés : sa moyenne est supérieure et sa distribution montre une forte proportion (58%) de valeurs supérieures à 0.98 (contre 35% pour 'Modesto' et 17% pour 'Palsteyn').

1.2.3. Etude conjointe des descripteurs

Les tableaux 4,5,6 et 7 montrent la matrice de corrélations des descripteurs sur l'ensemble des axes et par variété (le méplat, la longueur des entrenœuds et le diamètre à l'extrémité n'ont pas été indiqués, car leur étude présente peu d'intérêt à ce niveau). Les corrélations significatives sont marquées en gras. On distingue trois groupes de relations entre descripteurs : les relations entre les différents descripteurs de la morphologie, les relations entre les différents descripteurs de la géométrie, et les relations entre les deux types de descripteurs.

➤ **Descripteurs de morphologie**

Le diamètre moyen et la moyenne de l'inertie sont des variables fortement liées, comme l'illustre la figure 20. Les deux variables sont *a priori* dépendantes car leur calcul dérive des mêmes données locales. On note cependant que la moyenne de l'inertie est variable pour un diamètre moyen donné (sa valeur varie du simple au double), ce qui montre l'aspect complémentaire de ces deux descripteurs. De façon analogue, le fait que le volume soit fortement corrélé aux autres variables de dimension (diamètre moyen, longueur et moyenne de l'inertie) découle directement de la construction de ce descripteur.

La figure 21 montre une représentation conjointe du diamètre moyen et de la longueur des axes. Ces deux descripteurs sont fortement corrélés sur tout l'échantillon. Pour 'Lambertin', cette corrélation est relativement faible. Ceci est lié au fait que, pour une gamme de longueur donnée, le diamètre est fortement variable chez cette variété (ceux-ci varient pratiquement du simple au double pour les axes longs de 0.8 m à 1.2 m). La relation entre diamètre et longueur est sensiblement linéaire, ce qui justifie l'utilisation du rapport d'élancement comme descripteur synthétique de la morphologie.

➤ **Descripteurs de géométrie**

La figure 22 montre la distribution conjointe de l'inclinaison moyenne et de la courbure totale chez les trois variétés. Cette représentation met en évidence les différentes distributions des types de forme chez les trois variétés. La figure 23 donne une grille d'interprétation des types de forme des axes sur un plan inclinaison/courbure.

Sur l'ensemble des individus, l'inclinaison moyenne et la courbure totale ne sont pas significativement corrélées. La variété 'Modesto' est caractérisée par une inclinaison proche de la verticale et des courbures en général positives. L'inclinaison moyenne est supérieure à 45° pour 90% des axes de cette variété. L'inclinaison et la courbure présentent une corrélation négative significative : les courbures les plus fortes sont observées pour les axes d'inclinaison modérée (entre 30° et 60°). 'Lambertin' est caractérisé par des inclinaisons fortes (73% sont supérieures à 45°) et des valeurs de courbure (positives ou négatives) faibles en valeur absolue. Les inclinaisons et les courbures ne sont pas significativement corrélées. 'Palsteyn' se distingue par des inclinaisons faibles en moyenne, souvent

Figure 20 : relation entre la moyenne de l'inertie et le diamètre moyen pour les trois variétés étudiées.

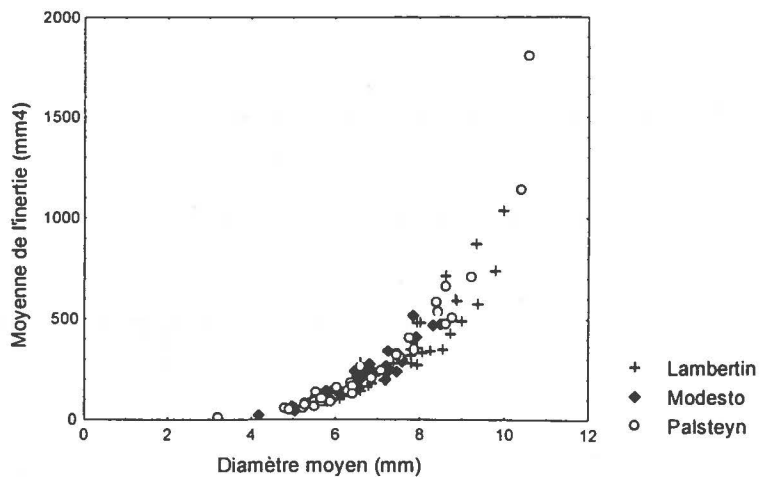


Figure 21 : relation entre le diamètre moyen et la longueur pour les trois variétés étudiées.

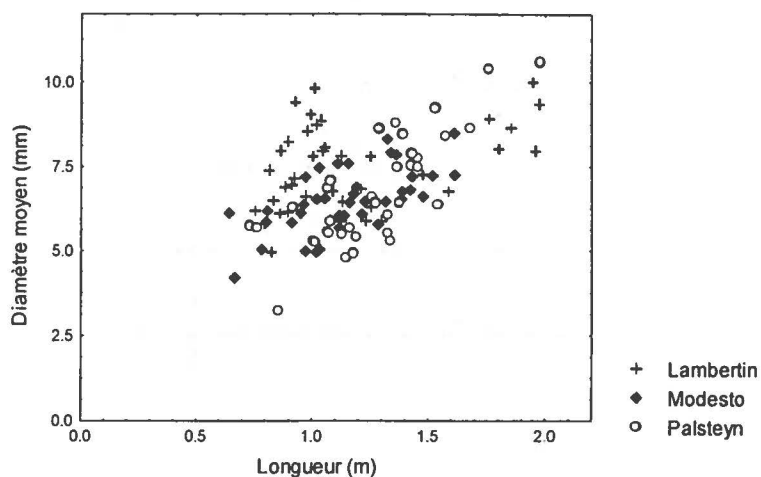


Figure 22 : relation entre la courbure globale et l'inclinaison moyenne pour les trois variétés étudiées.

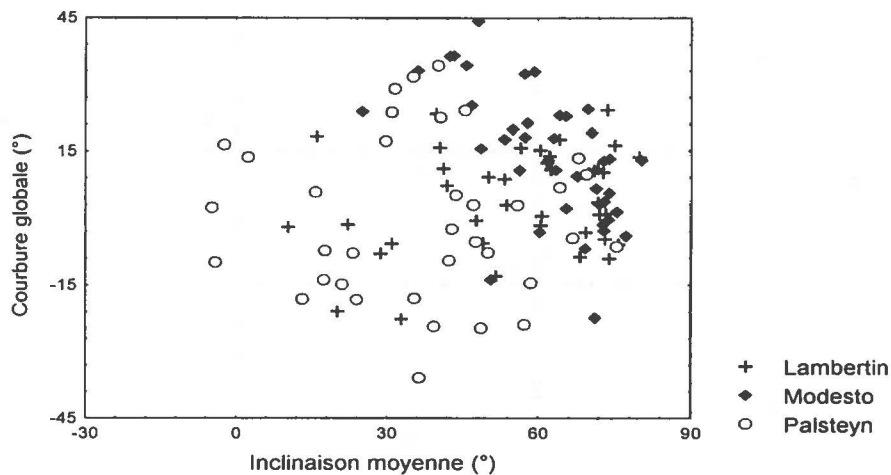
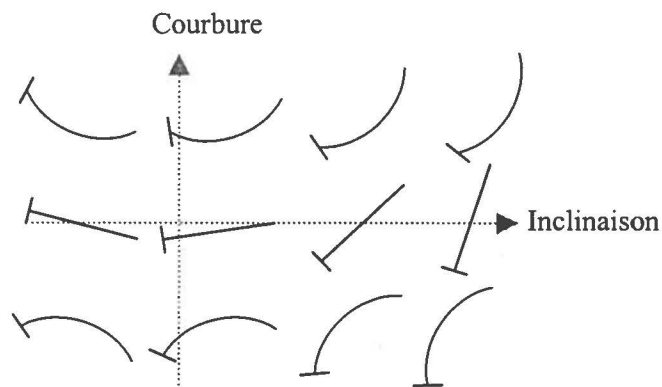


Figure 23 : représentation schématique de la forme des axes sur un diagramme courbure / inclinaison.



proches de l'horizontale et parfois négatives (36% seulement sont supérieures à 45°). On y trouve des axes à courbure positive comme négative, et ce descripteur n'est pas corrélé à l'inclinaison moyenne. Cette variété a la distribution la plus étendue, et on y retrouve tous les types de forme observés chez les autres variétés, y compris des axes très érigés.

➤ **Corrélations entre morphologie et géométrie**

Sur l'ensemble de l'échantillon, on a noté un certain nombre de corrélations significatives entre les descripteurs de la géométrie et ceux de la morphologie :

- le diamètre et l'inertie sont tous deux positivement corrélés à l'inclinaison moyenne (les axes les plus gros sont les plus verticaux).
- le rapport d'élancement et la courbure totale présentent une corrélation négative (les axes les plus élancés sont les plus courbés vers le bas).
- la conicité et la courbure totale présentent une corrélation positive (les axes les plus coniques sont les moins courbés vers le bas).

Les corrélations au sein de chaque variété sont de mêmes signes que celles calculées sur tout l'échantillon, mais ne sont pas toujours significatives. On reviendra sur ces corrélations à la partie VI pour les interpréter en terme de croissance et réorientation durant la première année de croissance.

1.2.4. Bilan : caractérisation des variétés

L'analyse des tous les descripteurs nous permet d'identifier les traits les plus caractéristiques de chaque variété. Rien ne distingue les variétés en ce qui concerne la conicité, le volume et l'inclinaison à la base. Toutes les autres variables ont par contre une distribution spécifique pour l'une au moins des trois variétés.

'Lambertin' est caractérisé par des axes peu élancés. C'est chez cette variété qu'on trouve la plus grande diversité du point de vue des caractères morphologiques. Cette diversité est au moins partiellement expliquée par l'existence de deux sous populations distinctes (l'une a des axes courts et trapus, l'autre des axes longs et élancés). Les axes de 'Lambertin' sont relativement verticaux et, surtout, plus droit que ceux des autres variétés.

'Palsteyn' est caractérisé par des axes un peu plus longs que ceux des autres variétés, mais surtout beaucoup plus élancés. Du point de vue géométrique, cette variété se distingue par une inclinaison plus proche de l'horizontale et des courbures fréquemment négatives. C'est la variété qui présente la plus grande diversité de géométries.

'Modesto' se situe de façon intermédiaire du point de vue de la morphologie. C'est chez cette variété que l'inclinaison des axes se rapproche le plus de la verticale. La plupart de ses axes sont nettement courbés vers le haut. C'est la variété la moins variable, tant du point de vue géométrique que morphologique.

La figure 24 fournit une représentation schématique des axes types de chaque variété, basée sur les valeurs moyennes de leurs descripteurs.

1.3. Evolution du chargement

Les résultats concernant les relations d'allométrie utilisées pour le calcul de la masse des organes sont présentés au paragraphe 1.3.1. Le paragraphe 1.3.2 présente une description qualitative du déroulement de la croissance, afin de localiser dans le temps les principaux événements phénologiques. Les deux grands types de productions axillaires (fruits et pousses) sont ensuite étudiés

séparément aux paragraphes 1.3.3 et 1.3.4 afin de tenir compte de la spécificité de leurs dynamiques de croissance. Au paragraphe 1.3.5, on les étudiera conjointement pour évaluer le chargement total imposé aux axes. En 1.3.6, on examinera les relations entre le développement des productions axillaires, la morphologie et la géométrie initiale de l'axe. Enfin, les principales caractéristiques du chargement et les spécificités des variétés seront synthétisées au paragraphe 1.3.7.

1.3.1. Relations d'allométrie utilisées pour calculer les masses

Les coefficients de détermination et les paramètres des relations établies pour les trois types d'organes sont indiqués dans le tableau 8.

➤ Fruits

La figure 25 montre l'allure de la relation pour les trois variétés. L'ajustement à une loi puissance est de bonne qualité, comme l'attestent les coefficients de détermination des relations. Les résidus de la régression ne sont pas structurés, ce qui indique qu'on peut considérer que la forme de la loi ne dépend pas de la taille des fruits, c'est à dire qu'une même loi décrit de façon satisfaisante l'allométrie des fruits tout au long de la saison. Le tableau 8 indique les estimations du coefficient α et de l'exposant β qui permettent d'obtenir la masse en mg à partir de la largeur en mm. Les lois de 'Lambertin' et 'Palsteyn' ne sont pas statistiquement discernables.

➤ Pousses courtes

La figure 26 montre l'allure de la relation pour la variété 'Lambertin' (les autres variétés ont des allures similaires). L'ajustement à une loi puissance n'est pas parfait, mais il rend mieux compte de la forme observée qu'une dépendance linéaire (le R^2 est meilleur et les résidus moins structurés). Les paramètres de la relation (tableau 8) donnent la masse en g à partir du nombre de feuilles. Les différences observées entre les β sont statistiquement significatives au seuil de 5%. 'Palsteyn' est la variété qui a les pousses courtes les plus lourdes pour un nombre donné de feuilles. Les différences restent faibles : pour donner une idée, la masse moyenne d'une pousse à 4 feuilles déployées est de 1.53 g pour 'Lambertin', 1.30 g pour 'Modesto' et 1.70 g pour 'Palsteyn'.

➤ Pousses longues

La figure 27 montre la masse des rameaux en fonction de leur nombre de feuilles pour les trois variétés. Le tableau 8 indique, pour chaque variété, le coefficient de détermination et les estimations des paramètres qui donnent la masse en g à partir du nombre de feuilles.

➤ Masse volumique apparente

La moyenne sur les 15 axes mesurés vaut 1.22 g/cm³ pour 'Lambertin', 1.14 g/cm³ pour 'Modesto' et 1.19 g/cm³ pour 'Palsteyn'. Rappelons que ces chiffres constituent une estimation directe de la relation entre masse et diamètre mesuré et non une estimation de la masse volumique réelle. Ils en sont probablement une surestimation car la méthode de mesure du diamètre implique une tendance à sous-évaluer le volume (les nœuds sont exclus).

1.3.2. Chronologie du déroulement de la croissance

Les variétés étudiées présentent des décalages de phénologie. Le stade de pleine floraison correspond au moment où 50% des fleurs sont au stade pleine fleur (Costes et al. 1995a). Il a été atteint autour du 09/02 pour 'Lambertin' et 'Palsteyn', et du 23/02 pour 'Modesto'. Afin de tenir compte de ce décalage

de floraison, les dates de l'année seront exprimées en « jours après pleine floraison » (DAFB¹³). La récolte des fruits a été faite à leur maturité, c'est à dire le 10/06 pour 'Lambertin' (120 DAFB), le 23/06 pour 'Palsteyn' (125 DAFB). Pour 'Modesto' les fruits présentaient des hétérogénéités de maturité et la récolte s'est faite en trois fois : le 24/06 (115 DAFB), le 01/07 (125 DAFB) et le 15/07 (140 DAFB).

Le débourrement des bourgeons végétatifs a eu lieu entre le 01/03 et le 05/03 pour 'Lambertin' et 'Palsteyn', entre le 15/03 et le 19/03 pour 'Modesto', soit une vingtaine de jours après floraison pour les trois variétés. Le déploiement de la partie préformée des pousses s'est fait dans les deux ou trois semaines qui suivent. Le développement de la partie néoformée des pousses longues s'est poursuivi plus ou moins tard dans la saison (jusqu'en août au maximum pour les pousses longues monocycliques). Une seconde unité de croissance s'est développée sur certains axes chez les trois variétés. Son démarrage a eu lieu autour du 10 Mai pour 'Lambertin' et 'Palsteyn' (90 DAFB), et autour du 14 Mai pour 'Modesto' (80 DAFB). Quelques axes de 'Lambertin' ont mis en place une troisième unité de croissance courant Juillet (150 DAFB). La chute des feuilles a eu lieu pendant le mois de Novembre. La figure 28 résume les dates des événements phénologiques des trois variétés.

Deux accidents climatiques ont eu de légères conséquences sur la charge en fruits des axes :

- un gel tardif pendant la floraison de 'Lambertin' et 'Palsteyn' a causé l'avortement d'une partie des fleurs. Son effet a été pour partie compensé au moment de l'éclaircissage (les axes touchés ont été peu éclaircis).
- une tempête au moment de la maturité de 'Palsteyn' a causé la chute prématurée d'une partie des fruits. Le redressement n'a donc pas pu être observé au moment de la récolte pour la plupart des axes de cette variété.

1.3.3. Quantification de la croissance des pousses

Les résultats relatifs aux descripteurs utilisés dans ce paragraphe (moyenne, écart type, comparaison des variétés) sont rassemblés dans le tableau 9. L'analyse est principalement basée sur la valeur des descripteurs à la date 4, c'est à dire en fin de saison. On se référera aussi à la date 2 (récolte) et à la date 1, située autour de 50 DAFB, c'est à dire après le déploiement des pousses courtes et avant le démarrage de la seconde unité de croissance. Le choix de cette date sera justifié lors de la description de la croissance des fruits.

➤ Fréquence des différents types de pousses

Le pourcentage de nœuds ayant donné une pousse est déterminé au moment du débourrement, et ne varie pas au cours de l'année (le débourrement des bourgeons n'a en général pas lieu en cours de saison, sauf pour des raisons traumatiques). Il a été évalué par le descripteur N%VG4, dont la distribution par variété est présentée figure 29. Il varie entre 30% et 95% sur l'ensemble des axes. Les différences entre variétés sont nettement significatives : 83% des nœuds en moyenne portent des pousses chez 'Lambertin', 63% chez 'Palsteyn' et 52% chez 'Modesto'. Les nœuds qui ne portent pas de pousses correspondent soit à un bourgeon dormant, soit à une cicatrice.

La proportion de pousses longues parmi les pousses est très faible en début de saison (N%RL1 est compris entre 1 et 2%, ce qui correspond à moins d'une pousse longue par axe en moyenne). Cette proportion augmente au cours de la saison avec le développement de la seconde unité de croissance¹⁴.

¹³ Days After Full Bloom

¹⁴ Sur l'ensemble des axes, les deux tiers des pousses longues sont constituées d'une UC1 courte et d'une UC2 longue.

En fin de saison, elle vaut 2.3% chez 'Lambertin', 4.8% chez 'Palsteyn' et 8.6% chez Modesto, les différences étant significatives. Ces moyennes cachent cependant une grande variabilité, comme l'illustre l'histogramme de N_{RL4} (figure 30). Chez 'Modesto', la plupart des axes ont développé une ou plusieurs pousse(s) longue(s). Deux tiers des axes de 'Palsteyn', et un peu plus de la moitié de ceux de 'Lambertin' en ont développé au moins une. La variable qualitative $RL4?$ permet de définir deux sous échantillons, en fonction de la présence ($RL4+$) ou de l'absence ($RL4-$) de pousses longues à la fin de la saison (le sous échantillon $RL4-$ de 'Modesto' ne comporte que deux individus et ne peut donc pas être considéré comme représentatif de cette variété ; il ne sera pas considéré dans la suite de l'analyse).

➤ Localisation des axillaires le long des axes

Les bourgeons dormants sont concentrés sur une zone plus ou moins étendue située dans la partie basale. Les pousses courtes sont distribuées tout le long des axes, en dehors de cette zone. Les pousses longues occupent des positions variées : beaucoup sont situées en position terminale ou sub-terminale (en particulier pour les axes très verticaux), mais on en trouve aussi fréquemment en position médiane. Ces proportions n'ont pas été quantifiées, mais la fraction massique du prolongement (M_{PR4} , figure 31) permet d'évaluer l'importance du développement de la zone apicale. Cette fraction est inférieure à 20% pour la plupart des axes, et ne dépasse 40% que pour quelques axes de 'Modesto'.

A l'échelle de l'axe, la localisation globale des pousses est quantifiée par la position relative de leur centre de gravité ($PVG4$). Son histogramme est fourni figure 32. Celui-ci est en moyenne situé aux deux tiers de l'axe, et est assez peu variable entre les axes. Les pousses de 'Modesto' sont en moyenne situées en position légèrement plus apicale que celles de 'Lambertin' et 'Palsteyn'. Ces positions sont peu différentes entre les sous échantillons avec et sans pousses longues.

➤ Dynamique de croissance des pousses

Les dynamiques de croissance des pousses ont été analysées séparément pour les sous échantillons avec et sans pousses longues, afin de tenir compte de leurs spécificités.

La figure 33 montre l'évolution sur la saison de la masse des pousses, pour le sous échantillon sans pousse longues. On voit que l'augmentation de la charge se fait sur une courte période en début de saison, correspondant au déploiement des pousses courtes. Après cette période, la croissance des pousses est complètement terminée.

La figure 34 représente l'évolution de la masse de pousses pour les axes avec pousses longues. Les courbes correspondent à la superposition des courbes de croissance des pousses courtes, des pousses longues monocycliques et des pousses polycycliques. On y voit nettement deux vagues de croissance correspondant au développement des UC1 et des UC2. La faible croissance visible entre 50 et 100 DAFB correspond à la participation des quelques pousses longues monocycliques à croissance prolongée. Les deux UC produisent une masse de pousses comparables (la seconde UC est un peu plus importante que la première chez 'Modesto' et un peu moins chez 'Lambertin'). Chez 'Lambertin', une troisième UC se développe vers 150 DAFB. Cette UC participe de façon moins importante à la charge totale en pousses.

Pour toutes les variétés, les deux tiers des pousses longues se mettent en place au moment de la seconde UC (réciproquement, cette seconde UC est constituée essentiellement de pousses longues).

Figure 33 : dynamique de croissance des pousses pour les axes sans pousses longues des variétés 'Lambertin' et 'Palsteyn'.

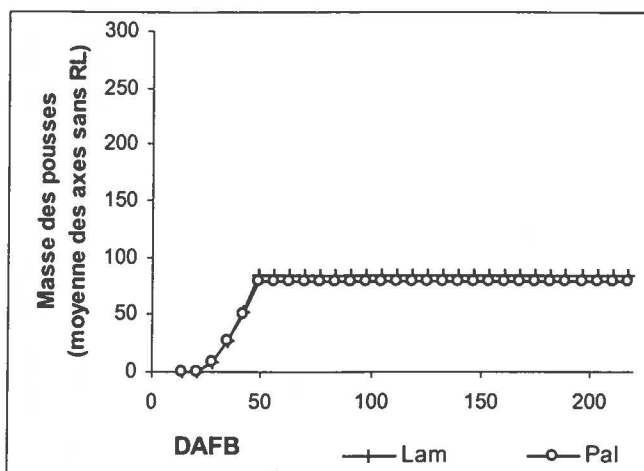
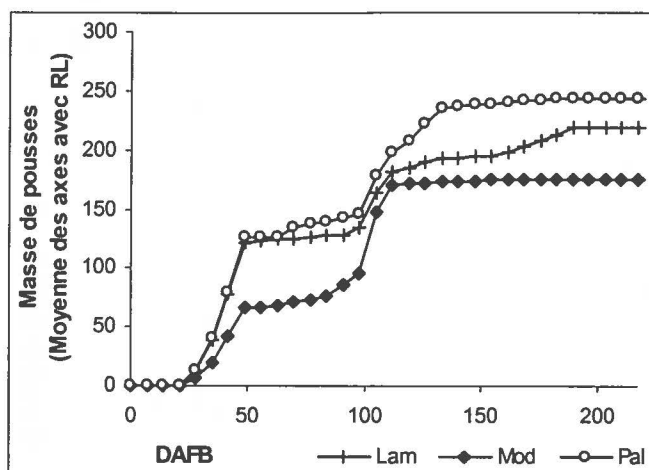


Figure 34 : dynamique de croissance des pousses pour les axes avec pousses longues des trois variétés étudiés.



➤ **Quantité totale de pousses**

La figure 35 présente l'histogramme de la fraction massique des pousses longues à la fin de la saison (M%RL4). Cette fraction varie entre 0% et 85% sur l'ensemble des axes. Elle est en moyenne nettement plus importante chez 'Modesto' (59% contre 19% chez 'Lambertin' et 25% chez 'Palsteyn').

La masse totale de pousses a été quantifiée à différentes dates. MVG1 correspond à la masse de pousses avant le démarrage de la seconde UC, c'est-à-dire à la masse des UC1 (en négligeant les rameaux longs monocycliques, qui sont très peu nombreux). MVG2 quantifie la masse de pousses à la récolte c'est-à-dire après la sortie des UC2. MVG4 est la masse en fin de saison, après le développement des UC3 et l'arrêt des pousses longues monocycliques. La distribution de ces descripteurs est illustrée sur les figures 36, 37 et 38. La part de l'UC1 dans la masse totale de pousses sur la saison est quantifiée par le rapport MVG1/MVG4. Il vaut en moyenne 68% pour 'Lambertin', 39% pour 'Modesto' et 62% pour 'Palsteyn'. La part de la masse de pousses sorties au moment de la récolte, quantifiées par le rapport MVG2/MVG4 vaut respectivement 88%, 98% et 97% pour 'Lambertin', 'Modesto' et 'Palsteyn'.

La masse totale finale de pousses (MVG4) diffère entre les variétés : 'Palsteyn' a la charge en pousses la plus importante et 'Lambertin' la plus faible ; ces différences ne sont cependant pas statistiquement significatives.

1.3.4. Quantification de l'évolution des fruits

Les résultats sont synthétisés sur le tableau 10.

➤ **Fréquence des fruits et dynamique de chute**

La figure 39 montre l'évolution du nombre moyen de fruits par axe (NBFR), de la nouaison à la récolte. La courbe montre une décroissance brutale vers 50 DAFB, qui correspond à un taux de chute important des fruits (30% pour 'Lambertin' et 'Palsteyn', 10% pour 'Modesto'). Cet événement correspond au phénomène de « chutes physiologiques ». La date 1 que nous avons choisie pour les descripteurs correspond à la fin de cette phase de chutes. Après cette date, le nombre de fruits est à peu près stable jusqu'à la maturité et la récolte.

Les histogrammes de nombre de fruits par axe aux différentes dates (NBFR0, NBFR1, NBFR2) sont présentés sur les figures 40, 41 et 42. Les données de 'Palsteyn' à la date 2 ne doivent pas être prises en compte à cause de l'accident climatique évoqué au 1.3.2. Le nombre de fruits par axe varie entre 0 et 16 sur l'ensemble de l'échantillon. Une proportion importante des axes (30 à 40% selon les variétés) ne porte aucun fruit. Les variables qualitatives FR1? et FR2? permettent de construire des sous échantillons avec et sans fruits aux dates 1 et 2.

Le nombre moyen de fruits par axe diffère entre les variétés : quelle que soit la date, c'est 'Modesto' qui porte en moyenne le plus de fruits et 'Lambertin' le moins. La significativité de ces différences n'est pas attestée par le test de Mann-Whitney, mais l'observation des histogrammes (et celle des axes) met en particulier en évidence le fait que les axes de 'Lambertin' ne portent pratiquement jamais plus de trois fruits.

➤ **Localisation de la charge en fruits sur l'axe**

Les fruits sont en général groupés sur la partie distale de l'axe. Après les chutes physiologiques, leur centre de gravité (PFR1) est situé à 90% de la longueur totale de l'axe pour 'Lambertin' et 'Modesto'. Pour 'Palsteyn', cette position est significativement moins distale (80%, voir figure 43). Pour les trois

Figure 41: histogramme de la distribution du nombre de fruits après les chutes physiologiques pour les trois variétés étudiées.

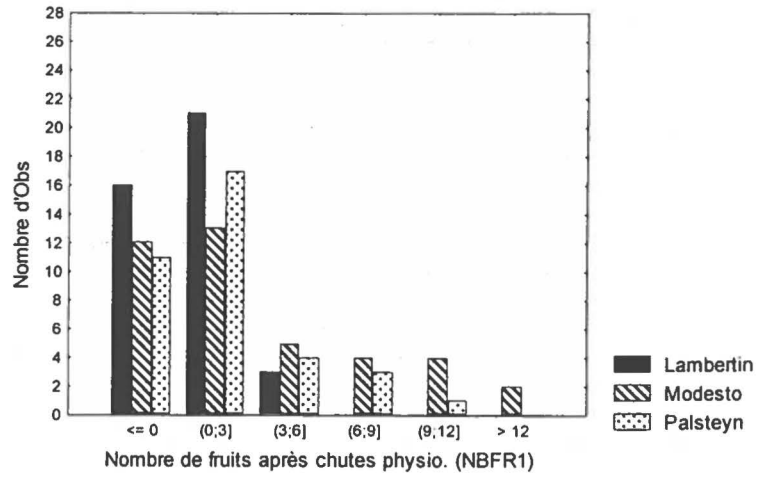


Figure 42: histogramme de la distribution du nombre de fruits à la récolte pour les trois variétés étudiées.

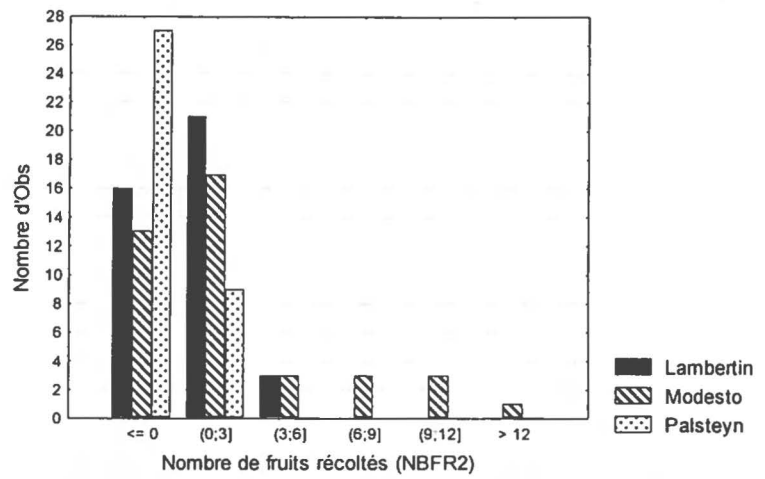
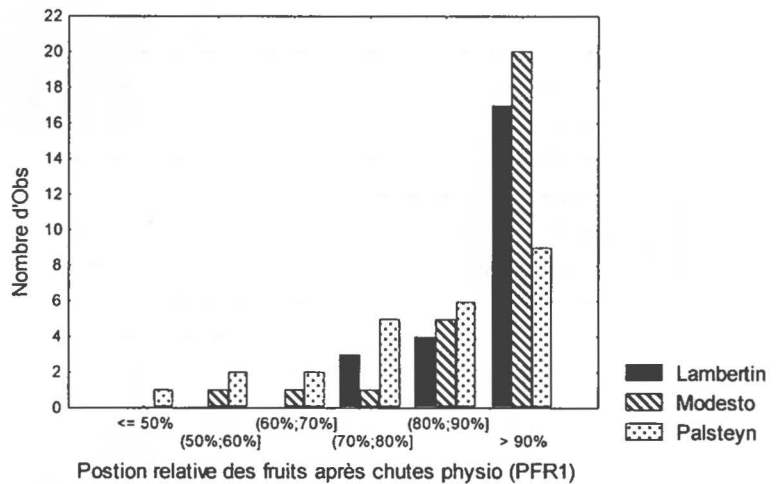


Figure 43: histogramme de la distribution de la position relative des fruits après les chutes physiologiques pour les trois variétés étudiées.



variétés, elle ne varie pratiquement pas au cours de la saison. En général, la plupart des fruits sont rassemblés sur les 20 ou 30 derniers centimètres de l'axe.

➤ **Dynamique de croissance des fruits**

La figure 44 montre l'évolution sur la saison de la charge moyenne en fruits (MFR) des axes qui portent des fruits après les chutes physiologiques (sous échantillon FR1+). Cette charge moyenne intègre deux processus : le grossissement des fruits et la variation du nombre de fruits par axe. Il est donc important de ne pas confondre ces courbes avec les courbes de croissance des fruits (présentées figure 45).

Les courbes sont décalées : en début de saison, la charge de 'Modesto' s'accroît plus tôt que celle des autres variétés par rapport à leur date de floraison (compte tenu des décalages de phénologie, les accroissements ont en fait lieu au même moment dans l'année); toujours chez 'Modesto', la croissance pondérale se ralentit entre 50 et 80 DAFB, avant d'entamer une phase finale d'accroissement rapide. La courbe de 'Lambertin' a une allure similaire, avec un ralentissement situé entre 70 et 90 DAFB. 'Palsteyn' est synchronisé avec 'Lambertin' en début de saison, mais le ralentissement paraît moins marqué et la phase de d'accroissement rapide commence plus tôt¹⁵.

A titre indicatif, le poids moyen d'un fruit à maturité est d'environ 45 g pour 'Modesto' et 60 g pour 'Lambertin' et 'Palsteyn'.

➤ **Charge en fruits des axes**

Il est difficile de caractériser la charge en fruits de façon simple, car celle-ci n'est pas monotone à cause des chutes de fruits. Nous nous référons aux charges totales des axes après les chutes physiologiques (MFR1) et au moment de la récolte (MFR2)¹⁶. Les distributions de ces descripteurs sont représentées sur les figures 46 et 47. La charge finale en fruits est très variable. Sur l'ensemble des axes, la charge maximale à maturité est 670 g pour 'Modesto', 251 g pour 'Lambertin' et 231 g pour 'Palsteyn'. Notons que pour 'Palsteyn' la charge maximale sur la saison a été atteinte avant les chutes accidentelles (558 g) et aurait certainement dépassé celle de 'Modesto' à maturité sans cet événement.

On a indiqué sur le tableau 10 la moyenne de la charge en fruits sur l'ensemble des axes, et la moyenne sur le sous échantillon avec fruits, pour les deux dates. A la date 1, 'Palsteyn' et 'Modesto' ont tous deux une charge moyenne en fruits supérieure à celle de 'Lambertin' (bien que la significativité de la différence ne soit pas attestée par le test). Au moment de la récolte, la charge moyenne en fruits sur tous les axes vaut environ 135 g pour 'Modesto' et 80 g pour 'Lambertin' (elle n'a pas pu être mesurée pour 'Palsteyn').

1.3.5. Quantification du chargement total

Les résultats sont rassemblés sur le tableau 11.

➤ **Nature du chargement**

Jusqu'à la récolte, le chargement total est la somme de la masse des pousses et de la masse des fruits. Ensuite, le chargement est entièrement constitué par les pousses.

La distribution de la part de la charge en fruits ($M\%FR$) aux dates 1 et 2 est représentée sur les figures 48 et 49. Cette fraction massique a été calculée sur le sous échantillon avec fruits. Pour ce sous

¹⁵ Ce point peut être lié à des décalages de maturité entre les axes de cette variété.

¹⁶ A cause des chutes (en particulier chez Palsteyn), la charge totale en fruits des axes est rarement monotone et son maximum ne correspond pas forcément au moment de la récolte. Un bon descripteur (qui n'a pas été mis en œuvre) serait l'intégrale de la charge sur la saison, exprimée en gramme-semaine.

Tableau 11 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs du chargement total pour les trois variétés étudiées. Les codes des descripteurs sont indiqués dans le texte (section 1.1).

	Normalité			Moyenne			Ecart type			Comparaison		
	L	M	P	Lam	Mod	Pal	Lam	Mod	Pal	L/M	M/P	P/L
M%FR1 (%)	**	*	**	18.7	36.3	24.1	18.7	28.7	22.2	**		
FR1+			*	31.2	51.8	34.7	13.6	18.8	18.3	**	**	
M%FR2 (%)	**	**	**	29.2	32.8	10.6	28.4	28.8	19.9		-	-
FR2+				48.6	48.5	42.4	19.6	21.2	14.2			
MTOT1 (g)		*		136	122	176	47	71	125			
MTOT2 (g)		**	**	219	300	211	109	189	177		-	-
MTOT4 (g)	**		**	155	168	189	137	95	187			

Les astérisques marquent les hypothèses rejetées (normalité ou identité des distributions) aux seuils de 5% (*) et 1% (**). Le symbole « - » indique que les tests n'ont pas été réalisés.

Figure 48 : histogramme de la distribution de la fraction massique des fruits après les chutes physiologiques pour les trois variétés étudiées.

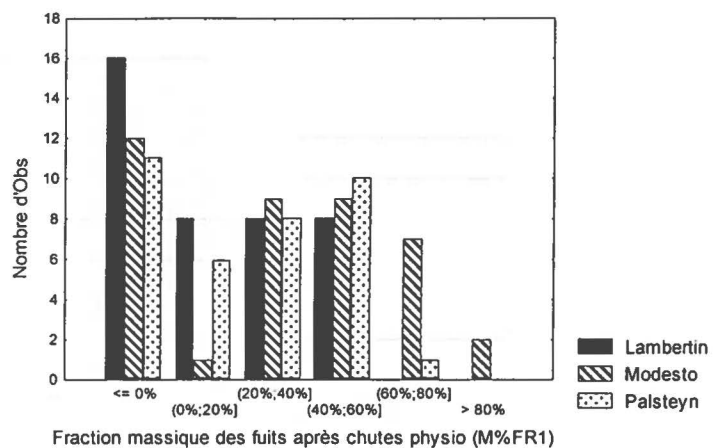
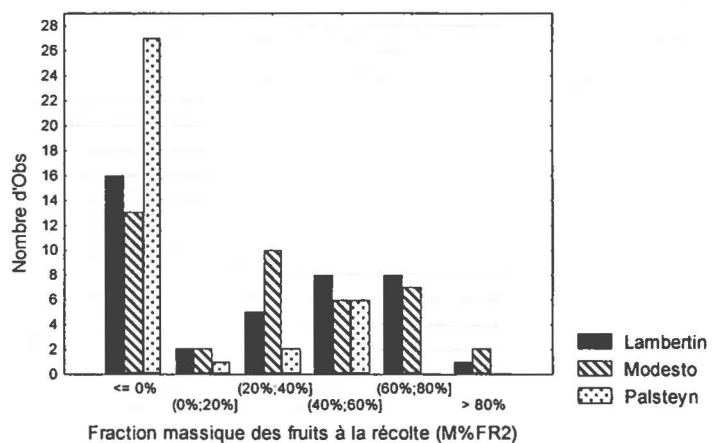


Figure 49 : histogramme de la distribution de la fraction massique des fruits à la récolte pour les trois variétés étudiées.



échantillon, les fruits représentent 31% de la charge pour 'Lambertin', 35% pour 'Palsteyn' et 52% pour 'Modesto' à la date 1. A la maturité, la fraction s'élève à 48% pour 'Lambertin' et 'Modesto', 42% pour 'Palsteyn'. Sur tous les axes, les fruits représentent en moyenne 30% de la charge à maturité, sans différence notable entre les variétés.

Notons que la quantité de fruits n'est significativement corrélée à la quantité de pousses pour aucune des variétés.

➤ Localisation du chargement le long des axes

La localisation du chargement est conditionnée à la fois par la celle des fruits (très localisée en position distale) et la répartition des pousses (plus diffuse et à peu près uniforme sur les deux derniers tiers de l'axe). On l'a mesurée par la position relative du centre de gravité de toutes les charges (PTOT). Les figures 50 et 51 montrent l'évolution de cette position pour les sous échantillons avec et sans fruits. Cette position varie globalement assez peu au cours de la croissance. La figure 52 montre la distribution de la position à la récolte (PTOT2).

➤ Chargement total des axes

Les figures 53 et 54 montrent la dynamique de chargement total (MTOT) des axes, pour les sous échantillons avec et sans fruits. Sa distribution aux dates 1 et 2 est représentée sur les figures 55 et 56. La distribution en fin de saison (MTOT4) correspond à celle des pousses (MVG4) et a déjà été présentée. Sur l'ensemble des axes, la charge totale moyenne est de l'ordre de 140 g à la date 1, de 250 g à maturité et de 170 g en fin de saison. A toutes les dates, 'Palsteyn' a une charge légèrement plus importante en moyenne que les autres variétés, bien que la différence ne soit pas significative.

1.3.6. Mise en relation avec la géométrie et la morphologie initiale

Les résultats présentés dans ce paragraphe sont basés sur l'analyse des corrélations entre les descripteurs du chargement et les descripteurs de la géométrie et de la morphologie initiale. Les corrélations ont été calculées sur l'ensemble des axes et par variété. L'objectif est de voir dans quelle mesure la croissance des fruits et des pousses (et donc du chargement) est conditionnée par l'état initial de l'axe (mesuré par sa géométrie et sa morphologie). On rapporte ici la significativité des corrélations qui sont intéressantes d'un point de vue biologique ou mécanique (les valeurs sont indiquées dans le tableau 12). Leur interprétation est différée à la discussion (partie VI).

➤ Descripteurs corrélés à l'importance du chargement

La masse de fruit (représentée par MFR1) n'est corrélée à aucun descripteur de la géométrie (INCM0, CTOT0) sur aucune variété. Elle est corrélée aux dimensions de l'axe (LONG, DMOY0, VOLU0) pour 'Modesto' et 'Palsteyn', mais pas pour 'Lambertin'.

La masse de pousses (limitée à l'UC1 : MVG1) est bien corrélée aux différents descripteurs des dimensions de l'axe pour les trois variétés, et en particulier au diamètre moyen. La relation est illustrée figure 57. Par contre, sa corrélation avec les descripteurs de géométrie n'est pas significative pour 'Modesto' et 'Lambertin'. Elle l'est pour 'Palsteyn', mais la corrélation reste faible.

Le développement du prolongement (décrit par MPR1) n'est corrélé ni aux dimensions ni à la géométrie initiale. La part de pousses longues (M%RL1) n'est pas corrélée à la géométrie mais aux rapports de dimensions des axes : elle croît avec la conicité (CONI0) et décroît avec l'élancement (ELAN0).

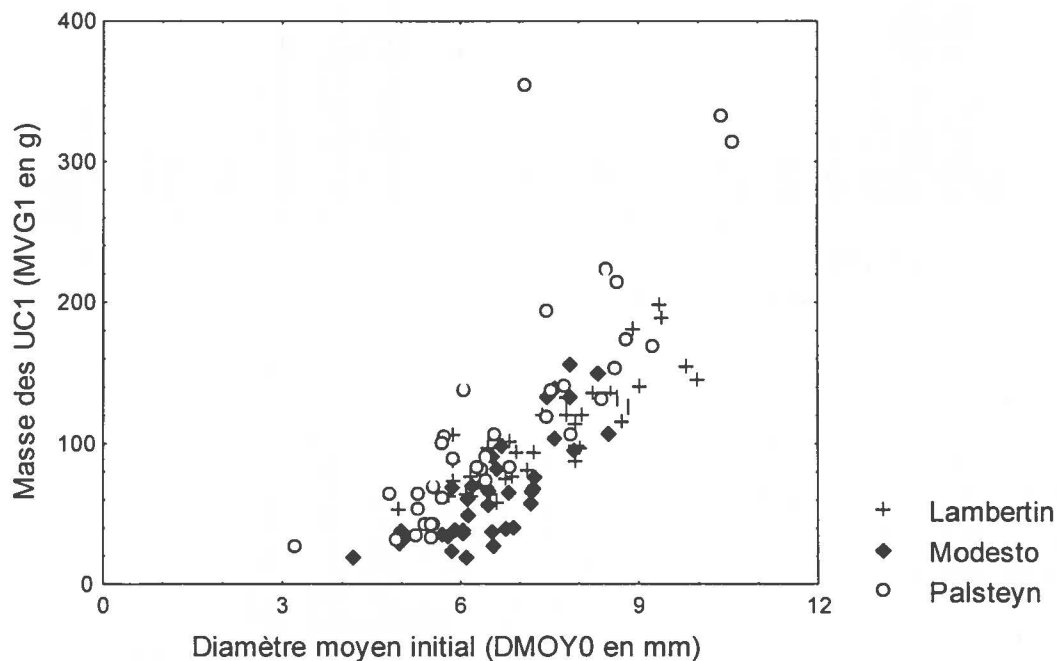
Les descripteurs relatifs à la croissance tardive (MVG14, MPR14) ne sont dans l'ensemble pas corrélés de façon significative aux descripteurs de la géométrie et de la morphologie initiale.

Tableau 12 : corrélations entre les descripteurs du chargement et descripteurs de la morphologie et de la géométrie initiale. Les codes des descripteurs sont indiqués dans le texte (section 1.1).

« n.s. » désigne les corrélations non significatives. On indiqué en grisé les corrélations significatives les plus faibles ($R^2 < 0.25$), et en gras les corrélations significatives les plus fortes ($R^2 > 0.5$).

Corrélation (R)	<i>Lam</i>	<i>Mod</i>	<i>Pal</i>
MFR1 # LONG	<i>n.s.</i>	.46	.34
# DMOY0	<i>n.s.</i>	.38	.53
# VOLU0	<i>n.s.</i>	.44	.41
MVG1 # LONG0	.44	.32	.58
# DMOY0	.85	.79	.80
# VOLU0	.72	.67	.79
# ELANO	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	-.45
# INCM0	.32	<i>n.s.</i>	.34
# CTOTO	<i>n.s.</i>	<i>n.s.</i>	-.36
M%RL1 # CONI0	.50	.49	<i>n.s.</i>
# ELANO	-.51	-.54	-.35
PVG1 # LONG	-.80	-.33	-.57
# CONI0	.84	.47	<i>n.s.</i>
# ELANO	-.86	-.50	<i>n.s.</i>

Figure 57 : relation entre la masse des UC1 et le diamètre moyen en début de saison pour les trois variétés étudiées.



➤ **Descripteurs corrélés à la localisation des pousses**

Pour la variété 'Lambertin', la localisation des pousses (décrite par PVG1) est très bien corrélée positivement à la conicité (plus l'axe est conique, plus les pousses sont situées près de l'apex) et négativement à la longueur et au rapport d'élancement. Ces corrélations se retrouvent de manière plus faible chez 'Modesto' et ne sont pas significatives chez 'Palsteyn'.

1.3.7. Bilan : caractérisation du chargement

Le chargement total est très variable entre les axes, mais les moyennes sont peu différentes entre variétés. L'essentiel du chargement se met en place avant la récolte des fruits, au cours de trois événements : la première unité de croissance, la seconde unité de croissance et le développement des fruits. Ces trois vagues de chargement sont quantitativement comparables, pour les trois variétés. On note cependant des spécificités variétales : pour 'Modesto', la seconde unité de croissance est plus importante que la première ; pour 'Lambertin', la charge en fruits est inférieure à celle des autres variétés. Les fruits constituent un chargement temporaire imposé aux axes. Ils sont aussi la principale source de variabilité du chargement total entre les axes.

1.4. Evolution de la morphologie

1.4.1. Quantification de la croissance diamétrale

La plupart des résultats exposés dans ce paragraphe sont rassemblés dans le tableau 13.

➤ **Croissance diamétrale totale des axes**

La figure 58 montre la distribution des diamètres moyens en fin de saison. Les distributions ne diffèrent pas significativement entre variétés. La croissance diamétrale totale a été décrite par l'accroissement relatif de diamètre moyen entre le début et la fin de la saison : $DMOY\%04 = (DMOY4 - DMOY0) / DMOY0$. La distribution de ce descripteur est illustrée figure 59. Les accroissements relatifs sont compris entre +5% et +180% sur tout l'échantillon. Ils sont de l'ordre de +50% en moyenne et ne diffèrent pas significativement entre variétés.

L'augmentation du diamètre se traduit par des gains d'inertie beaucoup plus importants. L'accroissement relatif d'inertie $MOYI\%04 = (MOYI4 - MOYI0) / MOYI0$ est extrêmement variable entre les axes. Sa distribution est illustrée sur une échelle logarithmique figure 60. Sur l'ensemble des axes, il varie entre +30% et +4700% (ce qui correspond à un facteur multiplicateur compris entre 1.3 et 48). Les distributions ne sont pas statistiquement différentes entre les variétés.

L'étude de la croissance diamétrale totale pour les sous échantillons avec et sans pousse longue (notés respectivement RL4+ et RL4-) montre que la croissance diamétrale est nettement plus importante pour les axes avec pousses longues que pour les axes qui n'en portent pas. Ceci se traduit par des accroissements d'inertie trois à quatre fois plus importants en moyenne pour les axes avec pousses longues que pour les axes sans pousse longue.

➤ **Répartition de la croissance le long des axes**

La croissance en diamètre n'est pas uniforme le long des axes. De façon générale, le diamètre à la base s'accroît plus rapidement que le diamètre à l'extrémité, ce qui se traduit par une évolution de la conicité des axes. Pour toutes les variétés, la conicité moyenne en fin de saison (CONI4) est supérieure à celle en début de saison (CONI0). Les conicités ne différaient pas significativement entre variétés en début de saison, comme on l'a souligné au 1.2.2. En fin de saison, des différences significatives apparaissent : la conicité moyenne de la variété 'Modesto' est inférieure à celle des autres variétés.

➤ Dynamique de croissance diamétrale

Les figures 61 et 62 montrent l'évolution du diamètre moyen pour les sous échantillons avec et sans pousse longue (par commodité, ils ont été représentés à des échelles différentes). Les dynamiques de croissance en diamètre de ces deux sous échantillons diffèrent quantitativement mais ont des formes similaires ; elles ont donc été analysées conjointement. La figure 63 montre l'évolution de la moyenne de l'accroissement hebdomadaire de diamètre. Pour 'Lambertin', la dynamique de croissance en diamètre peu se décrire en quatre périodes :

- jusqu'à 70 DABF, la croissance est très faible,
- entre 70 et 110 DAFB, le diamètre s'accroît rapidement,
- entre 110 et 140 DAFB, la croissance diamétrale est très fortement ralentie,
- ensuite, la croissance diamétrale redevient rapide, jusqu'à la fin de la période de mesure (220 DAFB). Pour cette variété, l'arrêt de la croissance n'a pas été observé pendant la période du suivi.

'Palsteyn' suit une évolution tout à fait semblable. En fin de saison, l'arrêt de la croissance diamétrale a été observé vers 220 DAFB. La dynamique de croissance en diamètre de 'Modesto' diffère sensiblement : son démarrage a lieu plus tôt (autour de 50/60 DAFB) et sa croissance en début de saison est supérieure à celle des autres variétés. Cette croissance se poursuit toute la saison en ralentissant progressivement, jusqu'à arrêt total vers 210 DAFB. Cette variété subit aussi un ralentissement de croissance diamétrale entre 110 et 140 DAFB, mais ce ralentissement est moins marqué¹⁷.

Les figures 64 et 65 montrent l'évolution de la moyenne de l'inertie pour les sous échantillons avec et sans pousse longue. On note en particulier que la plus grande part de l'accroissement d'inertie se fait en fin de saison pour les variétés 'Lambertin' et 'Palsteyn'. Les distributions des accroissements relatifs d'inertie aux dates 1 et 2 sont indiquées sur les figures 66 et 67. L'accroissement est exprimé en % par rapport à l'inertie en début de saison. Les moyennes et les comparaisons entre variétés sont indiquées sur le tableau 14. A la date 1 l'accroissement relatif d'inertie (MOYI%01) est de +25 à +30 % en moyenne, ce qui est très faible devant l'accroissement total sur la saison. A la date 2 les accroissements relatifs moyens (MOYI%02) sont de l'ordre de +200% pour 'Modesto' et +150% pour 'Palsteyn'. Cette valeur avoisine +80% pour 'Lambertin', et est significativement inférieure à celle de autres variétés.

L'accroissement relatif d'inertie (MOYI%04) sur toute la saison est extrêmement variable entre individus, mais sa moyenne est du même ordre de grandeur pour les trois variétés. Cependant, il ne se fait pas au même moment. La part de l'accroissement total d'inertie réalisée avant récolte a été décrit par le rapport MOYI02/MOYI04. La distribution de ce rapport est donnée sur la figure 68. Elle diffère significativement entre les variétés : 'Lambertin' réalise en moyenne 20% de son accroissement d'inertie avant récolte, 'Modesto' 56% et 'Palsteyn' 32%.

1.4.2. Lien entre croissance secondaire et croissance primaire

➤ Synchronisation entre les phénomènes

Les figures 69 à 74 montrent conjointement les dynamiques de croissance primaire et secondaire. La croissance primaire est caractérisée par l'incrément hebdomadaire de masse de pousses. La croissance

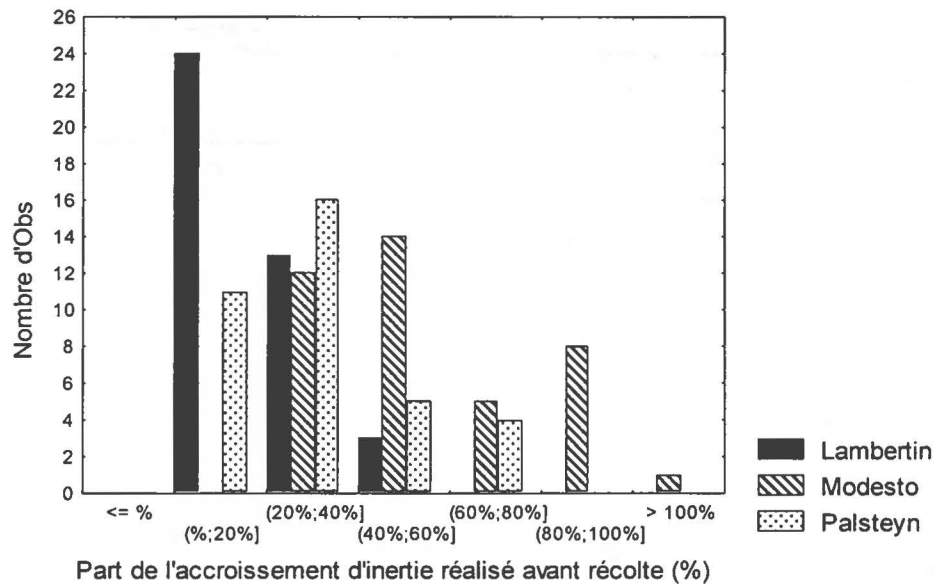
¹⁷ Nous avons vérifié que ceci n'est pas un artefact lié au calcul de la moyenne. En effet, il existe des décalages de phénologie entre les axes de 'Modesto' qui pourraient tendre à masquer les phénomènes quand on étudie la l'évolution de la moyenne. Cependant, l'absence de dépression de croissance marquée a été observée au niveau individuel pour les axes de cette variété.

Tableau 14 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs des accroissement d'inertie pour les trois variétés étudiées. Les codes des descripteurs sont indiqués dans le texte (section 1.1).

	Normalité			Moyenne			Ecart type			Comparaison		
	L	M	P	Lam	Mod	Pal	Lam	Mod	Pal	L/M	M/P	P/L
MOYI%01 (%)				24	24	33	17	22	45			
MOYI%02 (%)				84	211	158	73	193	177	**		**
MOYI02/MOYI04			**	20 %	56 %	32 %	11%	22%	19%	**	**	**

Les astérisques marquent les hypothèses rejetées (normalité ou identité des distributions) aux seuils de 5% (*) et 1% (**).

Figure 68 : histogramme de la distribution de la part de l'accroissement d'inertie totale réalisé avant la récolte pour les trois variétés étudiées (MOYI02/MOYI04).



secondaire est caractérisée par l'incrément hebdomadaire de diamètre moyen. Les courbes sont établies pour chaque variété à partir des moyennes sur les sous échantillons RL4+ et RL4-.

Les courbes de croissance primaire et secondaire sont similaires pour 'Palsteyn' et 'Lambertin'. Dans les deux cas la première unité de croissance est accompagnée d'un accroissement diamétral très faible. Deux à trois semaines après la fin du déploiement de la première UC commence une phase de croissance diamétrale rapide. Le démarrage de l'UC2 a lieu 5 à 6 semaines plus tard. La fin de la mise en place de l'UC2 s'accompagne d'une dépression temporaire de la croissance diamétrale. La croissance en diamètre reprend ensuite fortement, et se maintient jusqu'à la fin de la saison. Pour certains axes de 'Lambertin', une troisième UC a été mise en place. La figure 71 montre un exemple pour un axe ayant développé une troisième UC importante. Cette particularité concernant le développement des axillaires n'induit pas de différence qualitative du point de vue de la dynamique de croissance secondaire : celle-ci se produit toujours en deux vagues, la seconde vague étant quantitativement plus importante et plus soutenue en fin de saison.

Pour 'Modesto', la seconde unité de croissance est quantitativement plus importante que la première. De façon analogue, l'importance relative des deux vagues de croissance diamétrale est inversée par rapport aux autres variétés : la vague qui précède la seconde unité de croissance est plus importante que la croissance de fin de saison.

Les courbes des axes sans pousse longue (et sans seconde croissance) montrent, de façon plutôt surprenante, un rythme de croissance secondaire analogue à ceux avec pousses longues.

➤ **Corrélations quantitatives entre croissances primaire et secondaire**

L'étude des dynamiques de croissance primaire et secondaire a montré que les deux types de croissance se font essentiellement en deux vagues, quantifiées par MVG1, MVG14, DMOY02 et DMOY24. Les corrélations entre ces descripteurs, le diamètre en début de saison (DMOY0) et les descripteurs de la croissance totale (DMOY04 et MVG4) ont été établies pour chaque variétés. Elles sont présentées sur les tableaux 15abcd. Les résultats sont analogues pour les trois variétés. La corrélation entre DMOY04 et MVG4 est très bonne ($R^2 > 0.5$ pour les trois variétés). Cette interdépendance entre la quantité totale de pousses et la croissance diamétrale, souvent observée par ailleurs (Shinozaki et al. 1964) est illustrée sur la figure 75. Si on regarde les corrélations entre différentes vagues de croissance, on voit que la première unité de croissance des pousses est fortement corrélée au diamètre en début de saison, mais pas à la croissance diamétrale de l'année. La seconde unité de croissance est, par contre, beaucoup mieux corrélée à la croissance diamétrale en fin de saison qu'au diamètre initial.

1.4.3. Bilan : caractérisation de la croissance diamétrale

La croissance secondaire mène pour les trois variétés à un accroissement moyen du diamètre d'environ 50% sur toute la saison. Cette moyenne cache cependant des différences très importantes entre les individus : traduit en terme d'inertie, cet accroissement n'est jamais négligeable mais peut être relativement faible (+30% au minimum) et est parfois considérable (+4700%). Cet accroissement ne se fait pas uniformément le long de l'axe : les parties basales s'accroissent plus que les parties distales, ce qui induit une augmentation de la conicité. Sur l'ensemble de la saison, la quantité de croissance en diamètre est quantitativement bien reliée à la quantité de pousses végétatives.

Les résultats les plus notables concernent la dynamique de croissance en diamètre : la croissance diamétrale se fait en deux vagues nettement marquées, décalées par rapport aux vagues de croissance primaire. L'importance relative de ces deux vagues diffère entre les variétés. On note que la croissance en diamètre est pratiquement nulle en début de saison, alors que le chargement s'accroît à une vitesse

Tableau 15 : corrélations entre les descripteurs de la croissance primaire et de la croissance secondaire toutes variétés confondues (« tous ») et par variété. Les codes des descripteurs sont indiqués dans le texte (section 1.1).

« n.s. » désigne les corrélations non significatives. On indique en grisés les corrélations significatives les plus faibles ($R^2 < 0.25$), et en gras les corrélations significatives les plus fortes ($R^2 > 0.5$).

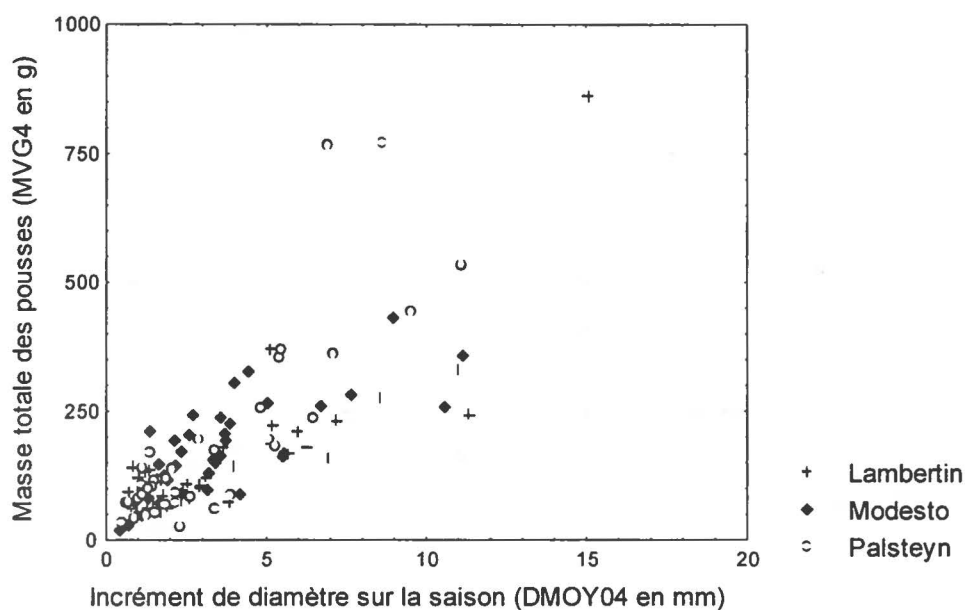
Tous	MVG1	MVG14	MVG4
DMOY0	0.76	0.31	0.57
DMOY02	0.27	0.63	0.62
DMOY24	0.48	0.67	0.74
DMOY04	0.45	0.74	0.78

Lam	MVG1	MVG14	MVG4
DMOY0	0.85	n.s	0.50
DMOY02	0.46	0.55	0.53
DMOY24	0.40	0.84	0.87
DMOY04	0.43	0.78	0.83

Mod	MVG1	MVG14	MVG4
DMOY0	0.79	0.33	0.58
DMOY02	0.46	0.59	0.67
DMOY24	0.42	0.71	0.74
DMOY04	0.49	0.71	0.77

Pal	MVG1	MVG14	MVG4
DMOY0	0.80	0.49	0.70
DMOY02	0.48	0.76	0.75
DMOY24	0.65	0.74	0.80
DMOY04	0.62	0.80	0.84

Figure 75 : relation entre la masse totale de pousses et l'accroissement de diamètre sur toute la saison pour les trois variétés étudiées.



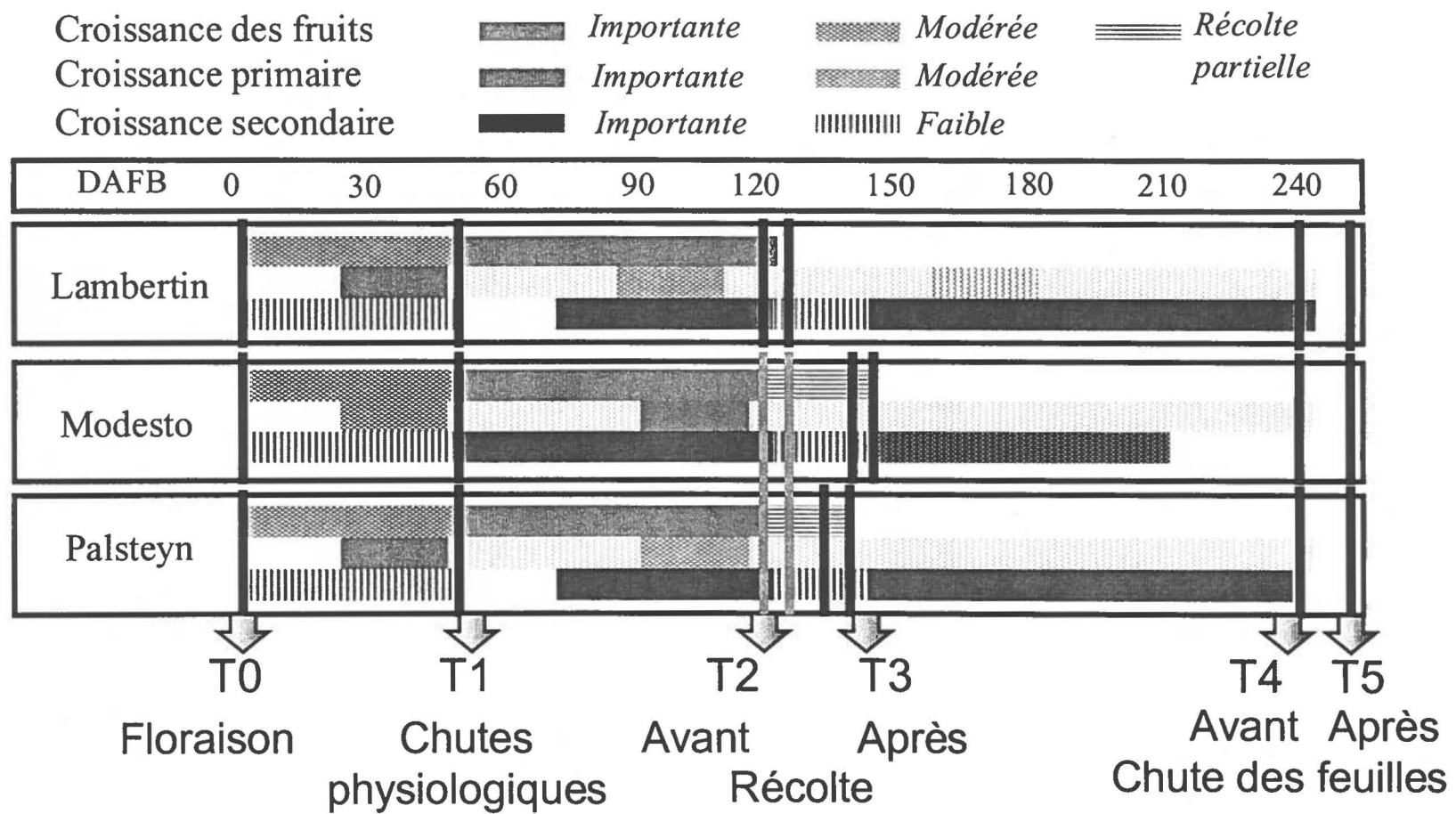


Figure 128 : dynamiques conjointes de croissance des fruits, des pousses et du diamètre

maximale sous l'effet de la première unité de croissance et de la première période de grossissement des fruits. La première vague de croissance en diamètre se fait à une période où la charge en fruits est maximale. La 2nde vague se réalise après la chute des fruits et l'arrêt total de la plupart des pousses.

La figure 128 illustre pour les trois variétés la dynamique conjointe de croissance des fruits, des pousses et du diamètre.

1.5. Evolution de la géométrie

1.5.1. Quantification des phénomènes de flexion et de redressement

La géométrie d'un axe à une date donnée a été caractérisée par plusieurs descripteurs. Les trois principaux descripteurs sont l'inclinaison à la base (INCB), l'inclinaison moyenne (INCM) et la courbure totale (CTOT). Pour étudier la flexion et le redressement au cours de la saison, nous allons nous intéresser à la variation de ces descripteurs entre différentes dates. L'étude se focalise sur les variations de courbure totale (qui traduisent la déformation des axes) et sur les variations de l'inclinaison à la base (qui traduisent la flexion de la structure porteuse). Les variations d'inclinaison moyenne résultent directement de ces deux descripteurs, et ne seront pas analysées en particulier (la figure 76 illustre la bonne corrélation entre les variations de ces descripteurs calculés entre les dates 0 et 1). Signalons que, si on néglige la variation d'inclinaison à la base, la variation de courbure totale est égale à la variation d'inclinaison de l'extrémité, et approximativement égale au double de la variation d'inclinaison moyenne.

Les résultats concernant ce paragraphe sont rassemblés sur le tableau 16.

➤ Distribution de l'intensité de la flexion

L'intensité de la flexion a été quantifiée par la variation de courbure totale entre le début de la saison et la maturité (CTOT02), et entre le début et la fin de la saison (CTOT05). La distribution de ces descripteurs est donnée sur les figures 77 et 78.

L'intensité de la flexion au moment de la maturité des fruits est comprise entre -1° et -145° sur l'ensemble des axes, et donc extrêmement variable. Elle a été étudiée séparément pour les sous échantillons avec et sans fruits à la date 1 (FR1+ et FR1-). Pour le sous échantillon FR1-, l'intensité de la flexion avoisine en moyenne -10° pour 'Lambertin', -20° pour 'Modesto' et -40° pour 'Palsteyn'. 'Palsteyn' accuse une flexion significativement plus importante que les autres variétés pour ce sous échantillon. Pour le sous échantillon FR1+, l'intensité moyenne de la flexion est de l'ordre de -60° pour 'Lambertin' et 'Palsteyn', et de -70° pour 'Modesto', sans différence significative entre les variétés. Pour ce sous échantillon, elle reste très variable entre les axes. Rappelons qu'au moment de la maturité, la plupart des fruits de 'Palsteyn' étaient déjà accidentellement tombés. L'intensité de la flexion à maturité n'a donc pas été directement observée pour cette variété (les chiffres qui sont donnés concernent la date de maturité réelle, qui se situe donc après la chute de nombreux fruits ; on doit donc se garder de comparer directement aux autres variétés).

Sur la totalité de la saison, les variations de courbures totales sont inférieures à celles observées à maturité. Elles sont aussi très variables, et nous les avons étudiées séparément pour les échantillons FR1+ et FR1-. Pour le sous échantillon sans fruit, la variation de courbure totale sur la saison vaut en moyenne -2° pour 'Lambertin', -14° pour 'Modesto' et -21° pour 'Palsteyn'. Cette moyenne cache encore une grande variabilité, et la flexion maximale observée vaut -55° pour ce même sous échantillon. Pour les axes avec fruits, les moyennes s'élèvent à -13° pour 'Lambertin', -40° pour 'Modesto' et -26° pour 'Palsteyn' (avec des maximales autour de -70°). Pour les deux sous

échantillons, 'Lambertin' accuse une flexion significativement moins importante que les autres variétés.

➤ **Dynamique de flexion/redressement des axes**

La figure 79 illustre l'évolution de la moyenne de la courbure totale sur la saison, pour les axes avec fruits des trois variétés. Pour les trois variétés, on distingue grossièrement trois phases : du début de saison à la récolte, la courbure diminue rapidement jusqu'à atteindre des valeurs fortement négatives ; au moment de la récolte, les axes se redressent brusquement, ce qui se traduit par une augmentation de la courbure totale (qui reste négative) ; entre la récolte et la fin de la saison, les axes se redressent progressivement. Le redressement apparent entre 100 et 130 DAFB pour les variétés 'Modesto' et 'Palsteyn' est un artefact lié à l'hétérogénéité des dates de maturité et aux chutes de fruits prématurées. En dehors de ce phénomène (que nous ignorerons pour la suite de l'analyse), les trois variétés ont des courbes qualitativement semblables. Des différences subsistent concernant l'intensité de chaque phase, nous y reviendrons ultérieurement.

La figure 80 représente l'évolution du même descripteur pour les axes sans fruit. On voit que les courbes de chaque variété ont des allures différentes. Pour 'Lambertin', la courbure diminue très légèrement jusqu'à 100 DAFB, puis remonte lentement jusqu'à 170 DAFB avant de se stabiliser. Pour 'Modesto', la courbure diminue jusqu'à 130 DAFB (avec un ralentissement entre 50 et 100 DAFB) et augmente ensuite lentement jusqu'à la fin de la saison. La dynamique de flexion de 'Palsteyn' a une allure nettement différente : la courbure subit une diminution très rapide en début de saison, qui reste importante jusqu'à 110 DAFB ; elle augmente ensuite jusqu'à la fin de la saison.

➤ **Evolution de l'inclinaison à la base**

La figure 81 montre l'évolution de l'inclinaison à la base, en moyenne sur tous les axes de chaque variété. Pour 'Palsteyn' et 'Modesto', on voit une diminution de cette inclinaison de l'ordre de 5° entre le début de saison et la maturité des fruits (elle est quasiment nulle pour 'Lambertin'). Ceci peut être attribué au fait que la charge en fruit des arbres cause une flexion des structures porteuses, qui se répercute sur l'inclinaison à la base des axes. Notons que les structures porteuses des axes ont été choisies de gros diamètre, et que leur flexion est de faible intensité.

Sur l'ensemble de la saison, la variation de l'inclinaison à la base est globalement faible. Sa distribution est illustré figure 82. Pour la plus grande part des axes, cette variation est comprise entre -5° et +5°. Elle ne dépasse 10° en valeur absolue que sur quelques cas. La variété 'Palsteyn' est la seule pour laquelle la variation d'inclinaison à la base est significativement non-nulle sur la saison (-1.5° en moyenne).

➤ **Quantification de la flexion et du redressement aux différentes phases**

La variation de courbure totale a été calculée pour toutes les périodes clés. Cinq descripteurs en découlent :

- CTOT01 quantifie la flexion qui a lieu avant le démarrage de la croissance en diamètre
- CTOT12 quantifie la flexion pendant la période de maturation des fruits
- CTOT23 quantifie le redressement à la récolte des fruits
- CTOT34 quantifie le redressement avant chute des feuilles
- CTOT45 quantifie le redressement lié à la chute des feuilles

Pour 'Palsteyn', les descripteurs CTOT12 et CTOT23 sont, comme on l'a déjà signalé, à interpréter avec prudence.

Les valeurs des descripteurs sont indiquées dans le tableau 17 pour chaque variété. On a indiqué les moyennes pour chaque sous échantillon (avec/sans fruits) et les moyennes sur tous les axes. On voit que pour les trois variétés la plus grande part de la flexion a lieu avant démarrage de la croissance en diamètre. Ceci est particulièrement vrai pour les axes ne portant pas de fruits, mais l'est aussi pour ceux qui portent des fruits. Les différences d'intensité de la flexion entre les variétés ont déjà été commentées.

Les trois dernières périodes donnent lieu à un redressement des axes. Pour les axes avec fruits, le redressement brutal au moment de la récolte compense pour partie la flexion. La part de flexion compensée par le redressement est évaluée par le rapport $-CTOT23/CTOT02$. Elle varie entre 1% et 80% sur l'ensemble des axes. Elle est en moyenne faible pour 'Modesto' (12%) et nettement plus importante pour 'Lambertin' (42%). Pour les raisons déjà exposées, elle n'a pas pu être directement mesurée pour 'Palsteyn', mais tout laisse à supposer qu'elle a été importante.

Le redressement sur la fin de la saison (avant la chute des feuilles) varie entre 0 et 45° sur l'ensemble des axes. Il vaut en moyenne 14° globalement pour 'Palsteyn' et 8° pour les autres variétés. Il est plus important pour les axes qui ont porté des fruits que pour les axes qui n'en ont pas portés, pour les trois variétés.

Le redressement à la chute des feuilles n'est pas négligeable : il est du même ordre de grandeur que celui qui a eu lieu entre la récolte et la chute des feuilles. Il diffère entre variétés : +5° en moyenne pour 'Lambertin', +8° pour 'Modesto' et +13° pour 'Palsteyn'.

➤ Lien avec les autres phénomènes mesurés

L'étude des causes de la flexion sera menée à la partie V par l'intermédiaire de modèles mécaniques. Afin de souligner l'intérêt de la modélisation mécanique, nous avons quantifié par un modèle linéaire dans quelle mesure la flexion totale sur la saison ($CTOT05$) peut être expliquée par les données autres que celles de géométrie. Le modèle a été déterminé en envisageant tous les descripteurs pertinents, et en sélectionnant ceux qui expliquent le mieux la flexion observée, *via* une régression incrémentielle ascendante pratiquée sur tout l'échantillon. Le meilleur modèle, obtenu avec 6 variables (MFR1, PTOT1, LONG, DMOY0, MTOT2, DMOY24), explique seulement 55% de la variabilité. Nous verrons à la partie V que la théorie mécaniste basée sur une approche mécanique permet de prévoir la flexion d'une manière beaucoup plus satisfaisante.

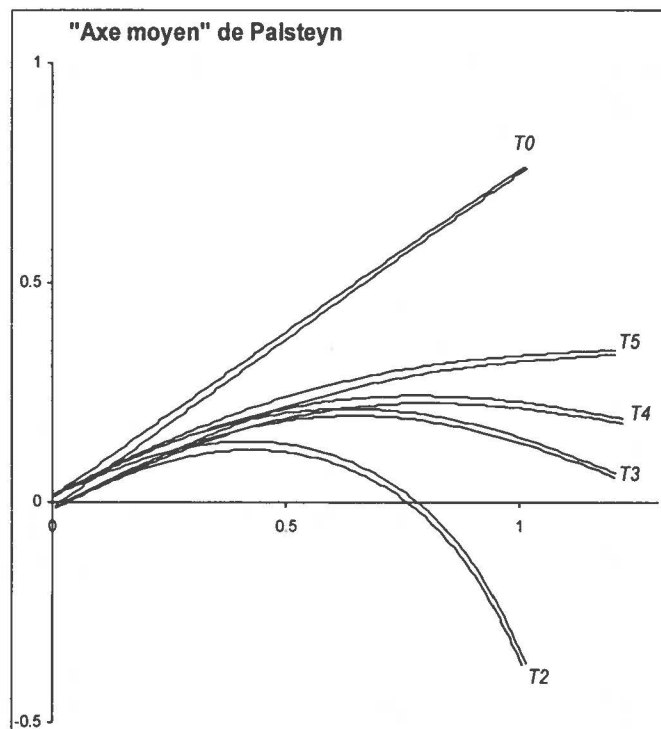
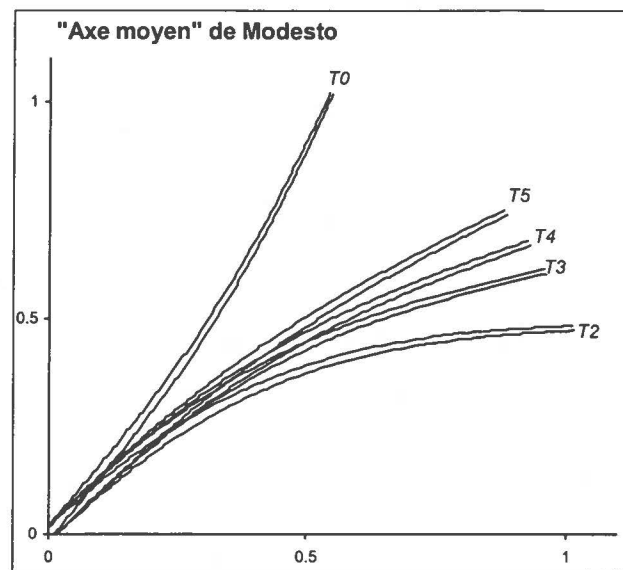
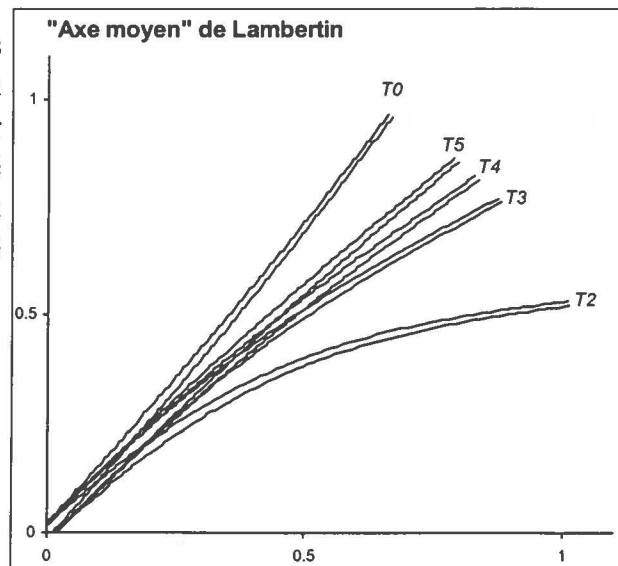
Les figures 83 à 88 représentent les dynamiques conjointes de l'accroissement d'inertie et de la courbure totale. Ces courbes mettent en exergue le fait que, pour les axes qui portent des fruits, la première vague d'accroissement d'inertie se produit (1) après qu'une grande partie de la flexion a déjà eu lieu (2) pendant la période à laquelle la courbure est la plus fortement négative.

1.5.3. Bilan : caractérisation de l'évolution de la géométrie

Les figures 89abc illustrent l'évolution de la géométrie (et de la morphologie) de l'« axe type » de chaque variété, établie à partir des valeurs moyennes des descripteurs aux différentes dates (la date 1 n'a pas été figurée par souci de clarté de la représentation).

Les flexions totales moyennes sur la saison sont cohérentes avec les observations concernant le port des variétés : 'Lambertin', variété qualifiée de dressée, est celle qui fléchit le moins sur l'année ; 'Modesto', bien que le plus dressé en début de saison, fléchit intensément sous l'effet de la charge ; 'Palsteyn', dont le port est qualifié de retombant, est effectivement le moins dressé en début de saison, et ce fait est accentué sous l'effet d'une flexion importante. Cependant ces observations, vraies en moyenne à l'échelle de la variété, cachent le fait que la flexion sur l'année est hautement variable entre

Figure 89 : représentation schématique des « axes moyens » de chaque variété aux différentes dates. Chaque axe a la longueur moyenne, le diamètre moyen, la conicité moyenne, l'inclinaison moyenne et la courbure globale moyenne de la variété concernée.



les axes. On note en particulier que les axes portant des fruits fléchissent beaucoup plus que les autres. Ceci est tout particulièrement vrai pour la variété 'Modesto'. On note aussi que les réorientations observées sont bien liées au phénomène de flexion des axes, et non à une variation de leur angle d'encastrement (celle-ci étant plus ou moins négligeable).

Les réorientations des axes dans l'année se sont grossièrement déroulées en deux phases : flexion jusqu'à la récolte (sous l'effet de la charge du feuillage, puis des fruits) puis redressement jusqu'à la fin de la saison (sous l'effet de la chute des fruits, puis des redressements actifs et de la chute des feuilles).

Le tableau ci-contre résume les valeurs de l'ensemble des descripteurs introduits dans cette partie.

IV-2. Propriétés mécaniques des matériaux constitutifs des axes

Les résultats concernant les propriétés mécaniques du bois, dont les méthodes de mesure ont été exposées au III-3 sont présentés dans ce chapitre. La section 2.1 concerne les résultats des mesures faites sur tronçons et la section 2.2 ceux des mesures faites sur les axes *in situ*.

2.1. Résultats sur tronçons

2.1.1. Comparaison des essais de flexion 3 et 4 points

Pour la plupart des séries de mesure le coefficient de corrélation de la régression était supérieur à 0.99, ce qui indique la bonne linéarité du comportement en flexion. Pour quelques mesures en flexion 4 points, ce coefficient de corrélation était inférieur et la structure des résidus de la régression indiquait clairement un comportement non linéaire. Ces séries de mesures n'ont pas été conservées dans la suite de l'analyse.

Les figures 90 et 91 montrent les histogrammes de distribution de l'élasticité estimée pour les trois variétés avec chaque méthode. Le tableau 18 montre l'intervalle de confiance normal à 5% sur la moyenne et la valeur de l'écart type (en MPa) pour les trois variétés et pour chaque méthode.

Variété	Flexion 3 points		Flexion 4 points	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
<i>Lambertin</i>	6962 ± 486	911	7073 ± 1216	1913
<i>Modesto</i>	7115 ± 540	1247	8061 ± 1658	2467
<i>Palsteyn</i>	6512 ± 634	1099	6650 ± 1123	1945

Tableau 18

Pour les trois variétés, les moyennes et les écarts types obtenus avec la méthode 4 points sont supérieurs à ceux obtenus avec la méthode 3 points. Le test de Mann-Whitney ne permet pas de mettre en évidence de différence statistique entre les données en flexion 3 points et 4 points, que ce soit tous axes confondus ou par variété. Cependant, au regard des données, la concordance entre les méthodes ne paraît pas du tout évidente. En particulier, le nombre de tronçons ayant des fortes valeurs de E diffère notablement entre les deux méthodes. La proportion de tronçons avec une élasticité estimée supérieure à 8000 MPa est de 10% pour la méthode 3 points et de 35% pour la méthode 4 points.

2.1.2. Mise en évidence d'un biais expérimental

Pour quelques tronçons, on a mesuré le module d'élasticité en flexion 3 points et en flexion 4 points pour s'assurer de la concordance entre les méthodes. Nous avons trouvé que, pour des déplacements faibles, la concordance entre les méthodes était mauvaise.

➤ Hypothèse de compression radiale

Nous avons émis l'hypothèse que la mauvaise concordance vient d'une perturbation non négligeable de la mesure liée à un poinçonnement au niveau des appuis. En effet, le tronçon repose sur des appuis durs avec une faible surface de contact, ce qui induit une pression non négligeable à ce niveau. Les tronçons sont entourés d'une écorce souple, dont le module d'élasticité en compression radiale est probablement faible. Compte tenu des dispositifs expérimentaux utilisés, le déplacement du milieu du tronçon se fait vers le bas en flexion 3 points et vers le haut en flexion 4 points. Si une compression

radiale non négligeable intervient au niveau des appuis, elle crée un déplacement additionnel vers le bas dans les deux cas. Le déplacement est alors surestimé pour la flexion 3 points et sous-estimé pour la flexion 4 points. Si cette hypothèse est vraie, on doit donc s'attendre à des valeurs de module estimées plus faibles en flexion 3 points qu'en flexion 4 points, ce qui est le cas dans les tronçons que nous avons mesuré. Un rôle des cisaillements transverses a été envisagé comme hypothèse alternative.

➤ **Mise en évidence expérimentale**

Afin d'établir avec certitude que ce fait est bien lié à la compression de l'écorce, nous avons réalisé l'expérience suivante : sur 5 tronçons provenant des trois variétés, le module d'élasticité a été évalué en flexion 3 points et en flexion 4 points. Les mesures ont été réalisées sur les tronçons entiers, puis on a supprimé localement un anneau d'écorce au niveau des appuis, et réitéré les mesures. La figure 92 présente sur un plan les valeurs d'élasticité déterminées par les deux méthodes à partir des tronçons entiers et annelés. La discordance entre les méthodes apparaît clairement sur les points représentant les tronçons entiers, et on voit que les estimations en 4 points sont toujours nettement supérieures à celles en 3 points. La figure 93 présente les valeurs déterminées avant et après annellation. On voit que l'annellation mène en général à une estimation supérieure pour les flexions 3 points et inférieure pour les flexions 4 points. La figure 92 montre que la concordance entre flexions 3 points et flexions 4 points est nettement meilleure sur tronçons annelés que sur tronçons entiers.

➤ **Conclusions**

Toutes ces observations sont cohérentes avec l'hypothèse de compression radiale. La différence entre les valeurs avant et après annellation démontre clairement la perturbation induite par la compression radiale de l'écorce. L'hypothèse de cisaillements transverses ne permet pas d'expliquer les résultats obtenus. Nous n'avons pas tenu compte de ce fait lors des mesures, mais il faut garder à l'esprit ses conséquences : les valeurs en 3 points sont plutôt sous évaluées alors que celles en 4 points sont plutôt surévaluées. Notons que cette perturbation peut être rendue négligeable si le déplacement est suffisant (mais on s'expose alors au risque de violer d'autres hypothèses du modèle). D'après nos observations, la perturbation est quantitativement plus importante en flexion 4 points¹⁸, on considérera donc que les valeurs en flexion 3 points sont plus proches de la réalité.

2.1.3. Sources de variabilité du module d'élasticité en flexion 3 points

Diverses sources possibles de variabilité de l'élasticité sont analysées dans ce paragraphe. Les résultats présentés se rapportent aux mesures faites en flexion 3 points.

➤ **Variété**

Les distributions des valeurs moyennes de module de chaque variété ont été comparées deux à deux à l'aide d'un test de Mann-Whitney au seuil de 5%. Aucune différence significative entre variétés n'a pu être mise en évidence.

➤ **Diamètre du tronçon**

La figure 94 montre les valeurs de module d'élasticité mesurées en fonction du diamètre moyen du tronçon pour les trois variétés. Le nuage de points montre une légère tendance à une diminution du module en fonction du diamètre. Cependant, cette corrélation n'est pas statistiquement significative, ni pour chaque variété prise individuellement, ni sur l'ensemble des variétés.

¹⁸ Ceci est lié au rapport entre la masse imposée et le déplacement, qui dépend des caractéristiques du dispositif utilisé.

En première approche, il semble donc que la dépendance entre le module d'élasticité et le diamètre local puisse être négligée au sein de l'axe.

➤ Position dans la pousse annuelle

La figure 95 montre le même échantillon de mesures représenté en fonction de la position du tronçon dans la pousse annuelle. La position est repérée par l'abscisse du milieu du tronçon par rapport à la base de l'axe. Ce facteur combine à la fois l'effet du diamètre, celui de l'âge des tissus de soutien et une éventuelle variation de la composition anatomique de l'axe. Là encore, le nuage de points montre une tendance à la diminution du module de la base vers le sommet de l'axe, mais cette tendance n'est significative pour aucune des variétés.

Les résultats obtenus en flexion trois points tendent donc à valider l'hypothèse d'homogénéité du module d'élasticité au sein d'un axe.

➤ Age du tronçon

Pour les tronçons de 1 an mesurés, le coefficient de corrélation entre les séries de masses et celles de déplacements a toujours été supérieur à 0.99, ce qui signifie que la linéarité du comportement en flexion est excellente. Le tableau 19 montre la moyenne et l'écart type du module estimé pour chaque variété, en MPa.

Variété	Moyenne	Ecart type
<i>Lambertin</i>	7170	1804
<i>Modesto</i>	6617	1941
<i>Palsteyn</i>	5959	714

Tableau 19

Aucune différence significative n'a été détectée entre les valeurs d'élasticité obtenues sur tronçons de 1 an de celles obtenues sur tronçons de deux ans. Bien que l'effectif de tronçons de 1 an soit faible, les valeurs obtenues n'engagent pas à chercher de différence importante en fonction de l'âge du bois à ce stade.

Notons cependant que dans les deux cas, les tronçons ont été prélevés en hiver. On ne peut pas exclure l'éventualité d'une variation intra-annuelle de la valeur du module homogénéisé sur la section. Il est possible que le module d'un tronçon de 1 an et demi soit inférieur à celui d'un tronçon de 1 an et à celui d'un tronçon de 2 ans. Cette hypothèse a été partiellement vérifiée au cours d'autres essais de flexion faits en cours d'année, non présentés dans ce document. Ces différences pourraient être dues à une variation dans l'année des propriétés de certains tissus (due, par exemple, à une variation de l'état d'humidité ou à la cinétique de lignification) et/ou à une variation de la contribution relative à l'inertie de chaque tissu (évolution du ratio bois/écorce ou bois de printemps/bois d'été). Ne disposant pas de données suffisantes sur ces variations, nous les négligerons.

2.1.4. Valeurs de module de cisaillement en torsion

La moyenne et l'écart type obtenus pour chaque variété sont indiqués dans le tableau 20 en MPa. Les différences entre les distributions des trois variétés ne sont pas significatives.

Variété	Moyenne	Ecart type
<i>Lambertin</i>	252	78
<i>Modesto</i>	246	21
<i>Palsteyn</i>	216	50

Tableau 20

2.2. Résultats des essais de flexion *in situ* sur axe entier

2.2.1. Essais de flexion

Le tableau 21 indique les valeurs obtenues pour chaque axe de l'échantillon 'validation' (pour un axe de 'Lambertin', certaines données ont été perdues et le calcul n'a pas été possible). Pour chaque variété, on a indiqué l'intervalle de confiance de la moyenne et l'écart type de la distribution des valeurs.

Variété	<i>Lambertin</i>	<i>Modesto</i>	<i>Palsteyn</i>
axe :	L23 : 4718	M19 : 5410	P30 : 6582
axe :	L30 : 3810	M20 : 6513	P31 : 4179
axe :	L32 : 6552	M22 : 5957	P37 : 5507
axe :	L33 : #####	M23 : 5342	P39 : 4285
axe :	L38 : 6875	M24 : 4830	P40 : 4414
Moyenne	5489 ± 1661	5611 ± 631	4994 ± 1015
Ecart type	1468	643	1035

Tableau 21

Les valeurs trouvées sont similaires pour les variétés 'Lambertin' et 'Modesto'. La moyenne de 'Palsteyn' est légèrement inférieure, bien que ce résultat ne soit pas statistiquement significatif.

Les valeurs d'élasticité obtenues à partir des essais de flexion *in situ* sont significativement inférieures à celles obtenues en flexion 3 points sur tronçons, quel que soit l'âge des tronçons. La différence entre les valeurs est quantitativement importante : les valeurs *in situ* sont en moyenne inférieures de plus de 20 % aux premières, quelle que soit la variété.

Aucune explication immédiate n'a pu être donnée à ce fait. Ce point sera discuté à la partie VI. Quoiqu'il en soit, étant donné que nous avons établi que les variations de module peuvent être négligées au sein d'un axe, nous préférons nous fier aux valeurs estimées sur axes entiers *in situ*, qui rendent directement compte des propriétés conditionnant la flexion en conditions naturelles.

2.2.2. Essais de fluage

Les essais mis en œuvre ont montré de façon claire la réalité du comportement visco-élastique des axes. La flexion d'axes soumis de façon durable à une charge constante s'accroît au cours du temps. La figure 96 illustre ce fait pour un axe de 'Lambertin'. La figure 97 montre, pour chaque variété, la diminution relative du module apparent donnée par le rapport $(E(t)-E(t_0))/E(t_0)$. Les coefficients de corrélation des relations et les valeurs de la pente α sont indiqués sur la figure.

La relativement bonne linéarité de la relation en fonction de $\log(t/t_0)$ nous indique que le module d'élasticité diminue au cours du temps de façon plus ou moins logarithmique : la variation est relativement rapide peu après la mise en charge, puis se ralentit au cours du temps. Les valeurs de α diffèrent entre variétés : 'Lambertin' est la variété chez laquelle l'effet de la visco-élasticité est le plus important et 'Modesto' celle pour laquelle il est le plus faible. Les différences entre variétés restent cependant assez faibles.

Les essais de fluage *in situ* nous fournissent un ordre de grandeur de l'effet de l'élasticité différée. Les valeurs de α nous donnent des points de repère : le module apparent a diminué d'un peu moins de 10% en une journée, et d'un peu plus de 15% en un mois. Si on extrapole la relation, on trouve qu'il faudrait attendre environ 1 an pour que cette baisse atteigne 20% (et un siècle pour qu'elle dépasse 30%). On peut facilement prendre en compte les phénomènes visco-élastiques en effectuant une

correction sur la valeur du module d'élasticité. Dans notre cadre, le temps caractéristique des déformations que l'on considère est compris entre un jour et un an. Le tableau 22 donne la valeur des facteurs de correction à appliquer au module mesuré instantanément, en fonction de la variété et du temps caractéristique considéré.

Variété	1 jours	1 semaine	1 mois	1 an
<i>Lambertin</i>	-11 %	-15 %	-19 %	-24 %
<i>Modesto</i>	-8 %	-11 %	-13 %	-17 %
<i>Palsteyn</i>	-9 %	-13 %	-16 %	-20 %

Tableau 22

De façon générale, nous ignorerons l'influence de la visco-élasticité après avoir fait une correction sur la valeur du module correspondant à un délais d'un mois. Une prise en compte plus précise, tenant compte de la dynamique de chargement, sera présentée au paragraphe 1.1.2 de la partie V.

2.3. Bilan - Conclusions

Aucune série de mesure n'a mis en évidence de différence significative d'élasticité entre variétés. Il est cependant intéressant de noter que pour les trois séries d'essais sur tronçons comme pour les essais *in situ*, la variété 'Palsteyn' est celle qui a le module le plus faible. Nous envisagerons donc systématiquement un module d'élasticité qui dépend de la variété. Les moyennes obtenues *in situ* seront prises comme référence, en tenant compte de la correction due à la visco-élasticité pour un temps caractéristique de 1 mois :

'Lambertin' : 4445 MPa

'Modesto' : 4887 MPa

'Palsteyn' : 4194 MPa

IV-3. Déformations Résiduelles Longitudinales

Toutes les mesures de déformations sont exprimées en microdéformations ($1 \mu\text{def} = 10^{-6} \text{ m/m}$). La plupart des déformations mesurées sont des retraits, ce qui correspond théoriquement à une valeur négative de déformation. Pour la clarté de l'exposé, nous présenterons l'opposé de la valeur des déformations (les valeurs positives désignent des retraits et les valeurs négatives des dilatations).

Chaque série de mesure de DRL inclut diverses sources de variabilité : la variété, la position de la mesure de long de l'axe, la position tangentielle de la mesure et éventuellement l'orientation de l'axe. L'effet de chaque facteur qualitatif (série de mesure, orientation de l'axe et position tangentielle) a été testé par une analyse de variance à un facteur de classification au seuil de 5 %.

3.1. Résultats

L'analyse de variance ne met pas en évidence d'effet significatif de la série de mesure. Nous analyserons donc en premier lieu les trois séries simultanément. La figure 98 montre l'histogramme de distribution des valeurs par variété. Pour les trois variétés, les valeurs de DRL sont comprises entre -400 et +6000 μdef . Les valeurs les plus fréquentes sont comprises entre 1000 et 2000 μdef . La distribution ne permet pas d'identifier de second pic dans les valeurs élevées, comme il est habituel de l'observer pour ce type de mesures (Fournier 1992).

L'analyse de variance, pratiquée sur les séries 1 et 2 ne met pas en évidence d'effet significatif de l'orientation de l'axe.

La figure 99 montre la distribution des valeurs en fonction de la position dans l'axe. La corrélation entre les deux variables n'est pas significative. Les valeurs de DRL mesurées semblent indépendantes de l'abscisse de la mesure.

Sur l'ensemble des mesures, l'analyse de variance ne permet pas de détecter d'effet significatif de la position tangentielle de la mesure, contrairement à ce qui était attendu. Pour chaque couronne de mesure, le « différentiel de DRL » a été calculé comme la différence entre la valeur mesurée en face supérieure et la valeur mesurée en face inférieure. La figure 100 montre la distribution de ce différentiel, toutes variétés confondues, pour chaque série de mesure. Le tableau 23 montre l'intervalle de confiance de la moyenne du différentiel, par variété et par série de mesure. On voit qu'aucune série de mesure n'a mis en évidence un différentiel moyen significativement positif. Pour la série 3, on trouve même un différentiel significativement négatif, ce qui signifie que les retraits trouvés en face inférieure sont en moyenne plus importants que ceux en face supérieure.

3.2. Discussion et conclusions

3.2.1. Caractère inhabituel des résultats

L'ordre de grandeur des déformations est globalement cohérent avec les valeurs habituellement mesurées sur des feuillus (Fournier 1992; Baillères et al. 1995). Cependant, l'absence de pic de distribution dans les valeurs fortes et, surtout, le signe du différentiel de déformation sont complètement inhabituels. En effet, il est usuellement reconnu que le bois de tension accuse des retraits à maturation nettement plus élevés que le bois normal. La valeur du retrait dépend de la nature du bois sous-jacent au point de mesure. Dans ce cas, on trouve habituellement deux pics de distribution correspondant aux valeurs de retraits du bois normal et du bois de tension. Le bois de

tension se répartit généralement de manière inégale dans la section : il est typiquement abondant sur la face supérieure de l'axe, et absent de sa face inférieure. En conséquence, on trouve en général un différentiel de déformation très fortement positif (le retrait en face supérieure est beaucoup plus élevé que celui en face inférieure).

Dans le cas de l'abricotier, nous montrerons dans le chapitre suivant que la distribution du bois de tension est conforme à ce schéma habituel : il est nettement localisé en face supérieure et absent en face inférieure. D'autre part, tout, dans la constitution de ce bois, laisse penser qu'il s'agit réellement d'un bois « de tension », c'est à dire que la valeur de sa déformation longitudinale de maturation (DLM) est fortement positive. Les résultats de Dumonceau (1995) sur des charpentières de 'Lambertin' et 'Modesto' sont cohérents avec ce qui est habituellement trouvé. Sur toutes les couronnes de mesures qu'il a réalisé, le retrait en face supérieure est toujours plus important que celui mesuré en face inférieure. Notons que ces mesures ont été pratiquées au printemps.

3.2.2. Interprétation de la mesure de DRL

Nous avons donc recherché les causes du caractère anormal de nos résultats dans l'interprétation de la mesure, c'est à dire dans les hypothèses qui permettent d'assimiler la valeur de DRL mesurée à la valeur de DLM du tissu sous-jacent. Pour expliciter le passage la DLM et la DRL, la notion de déformation résiduelle longitudinale de maturation (DRLM) a été introduite (Fournier et al. 1991b).

La DRL peut être assimilée à la DLM sous deux hypothèses :

- la déformation résiduelle mesurée ne provient que de la maturation (DRL = DRLM)
- les déformations de maturation ont été entièrement bloquées (DRLM = DLM)

Ces deux hypothèses vont être étudiées successivement.

➤ DLM = DRLM ?

La première équation postule que les déformations résiduelles mesurées sont à peu près égales aux déformations de maturation. L'hypothèse sous-jacente est que les déformations induites lors de la maturation des tissus sont pour l'essentiel bloquées, c'est à dire qu'une partie négligeable seulement de ces déformations s'exprime sous forme de redressement de l'axe. Cette hypothèse est vérifiée pour un axe suffisamment rigide (Fournier et al. 1991b).

Afin de vérifier la validité de cette hypothèse sur notre matériel, nous avons quantifié, sous des hypothèses simples, la part des DLM qui ne s'exprime pas, c'est à dire le ratio DRLM/DLM. Si on considère une section homogène de rayon R , dont la croissance en diamètre provoque l'addition d'une couche d'épaisseur ΔR soumise à maturation, il est facile de montrer (en ne considérant que la partie asymétrique des déformations de maturation, cf annexe 8) que la part des déformations qui ne s'exprime pas vaut : $DRLM/DLM = R^4/(\Delta R + R)^4$. Le tableau 24 indique la valeur de ce ratio en fonction de différentes valeurs de diamètre de l'axe, pour une couche d'épaisseur $\Delta R = 2\text{mm}$ (correspondant plus ou moins à l'épaisseur de la zone sur laquelle la mesure est réalisée). Pour la gamme de diamètre correspondant à notre matériel, ce ratio varie entre 40% et 70%. La DRLM mesurée est donc une sous-évaluation de la DLM, dans la mesure où une partie non négligeable des déformations de maturation se sont effectivement exprimées.

➤ DRLM = DRL ?

La seconde équation peut se formuler ainsi : les déformations résiduelles mesurées en périphérie des tiges sont essentiellement dues au phénomène de maturation. L'hypothèse sous-jacente est que, depuis la mise en place des couches de bois sur lesquelles la mesure est réalisée, la principale cause de

perturbation mécanique a été le phénomène de maturation, ce qui revient à dire que tout autre phénomène mécanique qui est intervenu depuis ce moment est négligeable devant les déformations de maturation. Dans le cas d'un tronc vertical et équilibré, cette hypothèse est en général tout à fait justifiée, car l'orientation du tronc varie très peu au cours de l'année.

Dans le cas de l'abricotier, cette hypothèse est très forte et mérite d'être vérifiée quantitativement. En effet, tous les axes de ces arbres sont soumis à des chargements importants et temporaires qui induisent plusieurs phases de réorientation dans l'année. Nous avons vu à la section 1 de cette partie que, pour les axes que nous avons suivis, on voit successivement une phase de flexion intense due à la sortie du feuillage et des fruits, une phase de brusque redressement liée à la chute des fruits, une phase de lent redressement actif des axes, puis une phase de redressement liée à la chute des feuilles. Ces diverses réorientations se traduisent localement par des déformations au niveau des couches périphériques. Lors de la flexion, la partie supérieure des axes subit une déformation en traction (+ ε) et la partie inférieure une déformation en compression (- ε). Lors d'un redressement, c'est l'inverse qui se produit. Soit un axe de longueur L , de diamètre homogène D , soumis, sous l'effet d'un déchargement, à une variation de courbure totale $\Delta C^{ot} > 0$ dont nous supposons qu'elle est également répartie le long de l'axe. Localement, la variation de courbure vaut $\Delta C = \Delta C^{ot}/L$. La déformation des couches périphériques est alors une compression (- ε) en face supérieure et une traction (+ ε) en face inférieure, avec $\varepsilon = \Delta C^{ot} D/2L$.

Le tableau 25 montre, pour différentes dimensions d'axes et différentes valeurs de redressement, l'ordre de grandeur de cette déformation. Les valeurs indiquées correspondent aux gammes de dimension du matériel sur lequel on a travaillé, et aux ordres de grandeurs de réorientations observées à la chute des fruits ou des feuilles. On voit que ces perturbations sont facilement de l'ordre de 1000 μdef , c'est à dire du même ordre de grandeur que les valeurs que nous avons mesurées. Lors d'un redressement, la perturbation se traduit par :

- une compression en face supérieure, qui s'ajoute à la forte tension liée à la maturation du bois de tension
- une traction en face inférieure, qui s'ajoute à la faible tension liée à la maturation du bois normal.

La figure 101 illustre ce phénomène. L'état de contrainte résultant dépend de la valeur précise de ces déformations. Les perturbations étant du même ordre de grandeur que les déformations de maturation, il est tout à fait possible que la face inférieure se retrouve plus tendue que la face supérieure, et qu'on mesure un différentiel de déformation inversé par rapport à celui qui a été effectivement mis en place par la maturation.

3.2.3. Conclusions

L'hypothèse DRLM = DRL semble donc fortement violée dans les cas étudiés, et sa violation, cumulée à celle de la première hypothèse, est susceptible d'expliquer la nature surprenante des résultats. Nous avons finalement conclu que la mesure des DRL avec la méthode que nous avons utilisée n'est pas une méthode d'estimation des DLM directement applicable sur les arbres fruitiers, à cause de leur propension à subir des réorientations intra-annuelles de grande ampleur.

Dans la suite, la prise en compte des réorientations actives se fera indirectement de deux manières :

- soit en supposant que la valeur des DLM est entièrement déterminée par la nature du bois, et en se basant sur les résultats de l'étude anatomique (chapitre 4 de cette partie).
- soit en postulant, par l'intermédiaire de « lois de redressement », une dépendance entre la valeur des DLM et une ou plusieurs variables causales (partie V).

IV-4. Bois de tension et excentricité

4.1. Méthodes de quantification

4.1.1. Automatisation des analyses d'images

La quantification de l'anatomie des sections a été réalisée sous le logiciel d'analyse d'image OPTIMAS®. Partant d'une image en noir et blanc (mode « trait »), ce logiciel identifie tous les contours fermés, et permet de calculer un certain nombre de descripteurs de ces contours, telles que leur surface, leur position par rapport au référentiel de l'image et leur position topologique (contours contenant ou contenus dans un contour donné). Le calcul des moments d'inertie d'ordre deux des zones n'est pas directement intégré dans les fonctionnalités proposées par le logiciel. Nous avons cependant pu les obtenir de façon indirecte en exploitant les résultats d'autres fonctions¹⁹.

Etant donné le nombre de coupes à analyser (plus de 600), nous avons choisi d'automatiser les traitements à l'aide du langage de programmation ALI, qui permet de personnaliser des traitements et de les intégrer à OPTIMAS par l'intermédiaire de macros. La macro réalisée intègre notamment :

- l'identification directe de la nature des contours (cerne, moelle ou bois de tension) en se basant sur des critères topologiques et sur des descripteurs de leur forme.
- le calcul des positions et des moments d'inertie des zones par rapport à un référentiel choisi par l'utilisateur (le référentiel de l'image, le centre de la moelle, celui de la section ou celui de la zone).
- le calcul de descripteurs synthétiques (cf. 4.1.2).
- le traitement de plusieurs images en série.
- une interface conviviale pour l'utilisateur, qui permet de choisir entre diverses options pour l'extraction des résultats.

En outre, la macro développée permet de réaliser des ajustements paramétriques des contours (à une ellipse pour les cernes annuels et la moelle, à une bande tangentielle à 4 degrés de liberté pour les zones de bois de tension). Le résultat est illustré figure 102. Ces fonctionnalités ont été développées pour permettre la prise en compte explicite de l'anatomie dans un modèle à section composite. Elle n'est pas utilisée dans les résultats qui sont présentés dans ce mémoire.

4.1.2. Descripteurs de l'anatomie d'une section

Nous nous intéressons à l'anatomie transverse des tiges pour en évaluer les conséquences mécaniques, dans le cadre du redressement actif conséquent aux déformations de maturation. Nous avons signalé que deux phénomènes sont impliqués : l'excentricité et le bois de tension (BT). Pour chaque cerne annuel de chaque section, ces phénomènes ont été décrits à l'aide de descripteurs quantitatifs.

➤ Descripteur de l'excentricité

L'excentricité d'un cerne a été caractérisé par la position de son centre géométrique relativement à son centre biologique. Nous nommons centre biologique d'un cerne le centre géométrique du cerne

¹⁹ Le logiciel fournit des fonctionnalités d'ajustement d'un contour donnée à une forme paramétrique (rectangle ou ellipse) qui se basent manifestement sur des procédures de calculs d'inertie. Les résultats intermédiaires de ces fonctions peuvent être extraits et exploités pour les calculs d'inertie. La validité des résultats a été confirmée sur des formes géométriques simples pour lesquelles l'inertie a été calculée de façon indépendante.

précédent (ou, en ce qui concerne le premier cerne de croissance, le centre géométrique de la moelle). L'excentricité est quantifiée par la différence entre les positions de ces deux centres. Afin de comparer des sections de dimensions différentes, ce terme a été rapporté au rayon du cerne. Le résultat est une paire de réels signés (X_{Ex} , Z_{Ex}) correspondant chacun à la composante de l'excentricité selon les directions X et Z de l'image. Ces descripteurs valent 0 si le cerne n'est pas excentré. Leur signe indique la direction de l'excentricité et leur valeur absolue son intensité. Si un cerne donné a un rayon R et le cerne précédent a un rayon R_0 , le descripteur vaut au maximum $1-R_0/R$ en valeur absolue. Cette valeur maximale correspond au cas où les deux cerne sont tangents en un point. La figure 103 illustre la valeur de ce descripteur dans quelques cas exemplaires, afin de donner des points de repère.

D'autres descripteurs ont été proposés dans la littérature, notamment le rapport entre l'épaisseur maximale et l'épaisseur minimale du cerne (Robards 1965; Bouillet 1993; Wilson et Gartner 1996). Nous avons cependant préféré celui défini ci-dessus, car sa valeur est signée (ce qui permet de qualifier le sens de l'excentricité) et est nulle pour un cerne centré.

➤ Descripteurs du BT

D'un point de vue mécanique, le paramètre pertinent pour caractériser l'efficacité d'une plage de BT en terme de redressement est son moment d'inertie d'ordre 1²⁰, c'est à dire le produit de sa distance à l'axe neutre en flexion par sa surface. La surface de BT conditionne l'intensité de l'effort exercé au cours de la maturation, et sa distance à l'axe neutre conditionne l'asymétrie de cet effort au sein de la surface, qui induit la flexion (voir II-3.2 pour une présentation mécanique plus rigoureuse). Nous n'avons pas utilisé directement le moment d'ordre 1 comme descripteur de la distribution du BT pour plusieurs raisons. D'une part, ce descripteur intègre deux notions distinctes que nous voulons étudier séparément : la quantité de BT et sa position. D'autre part, sa valeur dépend fortement de la dimension de la section, ce qui ne permet pas de comparer directement la distribution du BT de sections de taille différente. Nous avons donc utilisé deux descripteurs adimensionnés.

Le premier descripteur est la surface relative de BT dans le cerne (BT%), définie comme la somme des surfaces des plages de BT, rapportée à la surface du cerne. Ce descripteur vaut 0 si il n'y a pas de BT et 1 si le cerne est entièrement constitué de BT.

Le second descripteur caractérise la position du BT dans le cerne. Il est défini comme la position du centre de gravité des zones de BT (exprimé par rapport au centre géométrique du cerne) rapportée au rayon du cerne. C'est une paire de réels signés (X_{Bt} , Z_{Bt}), dont chaque élément caractérise la position par rapport à l'un des axes du repère. Une valeur de 0 indique que le BT est globalement centré par rapport à l'axe considéré, c'est à dire qu'il n'induit pas de flexion autour de cet axe. Le signe du descripteur indique le sens du redressement provoqué par le BT. Une valeur absolue proche de 1 indique que le BT est très concentré d'un côté du cerne.

4.2. Identification des éléments anatomiques

L'objet de ce paragraphe n'est pas de décrire exhaustivement le plan ligneux de l'abricotier. Les principaux éléments qui aident à la lecture de coupes transverses en vue d'identifier les cerne annuels et les zones de BT seront présentés.

Aucune différence notable n'a été observée entre les variétés dans l'agencement des différents types cellulaires au sein des sections. Les principaux éléments caractéristiques du bois d'abricotier seront

²⁰ son moment d'inertie d'ordre 2 est pertinent pour rendre compte de la participation de la plage à la rigidité en flexion, mais pas pour évaluer l'impact sur le redressement.

illustrés sur l'exemple d'une coupe transverse de tige de la variété 'Lambertin' (figure 104). La coupe est située sur une zone recouvrant les cernes de croissance 1998 et 1999. Le cerne 1999 démarre par une zone riche en vaisseaux de gros diamètre (zone initiale poreuse). Le diamètre et le nombre des vaisseaux diminuent rapidement après cette zone. On observe ensuite une zone très dense en fibres (en l'occurrence, de BT). S'en suit une zone de transition relativement riche en vaisseaux, qui forment des alignements radiaux (« files » de vaisseaux) ou tangentiels (« faux cerne »). Enfin, le bois final est formé de fibres et de vaisseaux de petit diamètre, distribués de manière diffuse. La figure montre en outre de nombreux rayons ligneux qui forment le parenchyme horizontal. Les différents types cellulaires sont illustrés sur les photos obtenues en microscopie électronique à balayage (figures 107, 108 et 109).

L'observation de l'ensemble des coupes montre que le BT est la plupart du temps concentré au niveau de bandes tangentielles formant des croissants d'extension variable. Ces zones sont localisées aussi bien au niveau du bois initial (comme sur la figure 104) que du bois final. La figure 102 montre une coupe de tige de 'Palsteyn' colorée au Bleu Astra / Safranine. On y voit la moelle, les cernes annuels et les zones de BT, ainsi que leur tracé figuré (à droite). Sur le cerne de première année, on trouve plusieurs croissants distincts, aussi bien au niveau du bois initial que du bois final. Sur le second cerne, on voit trois zones de BT successives très rapprochées, allant du bois initial au bois final. Ces zones sont partiellement confondues dans la direction radiale, mais ont des extensions tangentielles distinctes. Pour les deux cernes, le BT est essentiellement localisé dans la moitié supérieure de la section.

On a observé du BT dans la quasi totalité des sections observées. Les zones de BT se présentent toujours sous forme de croissants, dont l'extension radiale est comprise entre quelques centaines de microns et quelques millimètres et dont l'extension angulaire varie entre 15° et 270°.

4.3. Distribution du BT dans l'échantillon principal

4.3.1. Analyse globale sur toutes les coupes

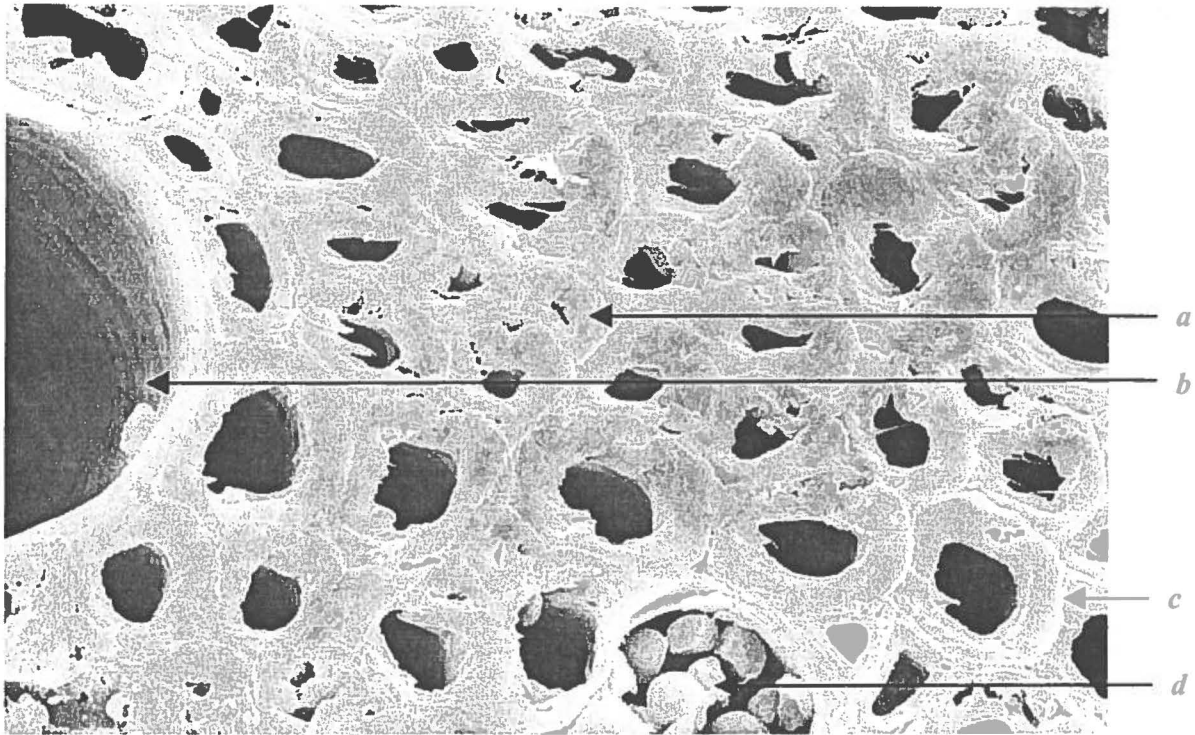
Sur l'ensemble des coupes réalisées sur les axes de l'échantillon principal, le pourcentage de BT varie entre 0% et 50%. Les figures 105 et 106 montrent les histogrammes des pourcentages de BT pour chaque cerne. Le pourcentage moyen est significativement plus élevé pour le cerne 1999 (22%) que pour le cerne 1998 (16%). On a indiqué dans le tableau 26 la moyenne et l'intervalle de confiance de tous les descripteurs pour chaque cerne annuel.

La distribution transverse du BT peut être appréhendée grâce aux descripteurs X_{BT} et Z_{BT} qui indiquent la position du centre de gravité du BT relativement au cerne. On voit que la composante X_{BT} n'est significativement différente de 0 pour aucun des deux cernes, ce qui indique que le BT est également distribué dans les parties droite et gauche des coupes. La composante Z_{BT} est par contre significativement positive pour les deux cernes, ce qui indique que le BT est situé préférentiellement dans le haut des sections. Comme attendu, cette localisation en face supérieure est plus marquée pour le cerne 1999 que pour le cerne 1998.

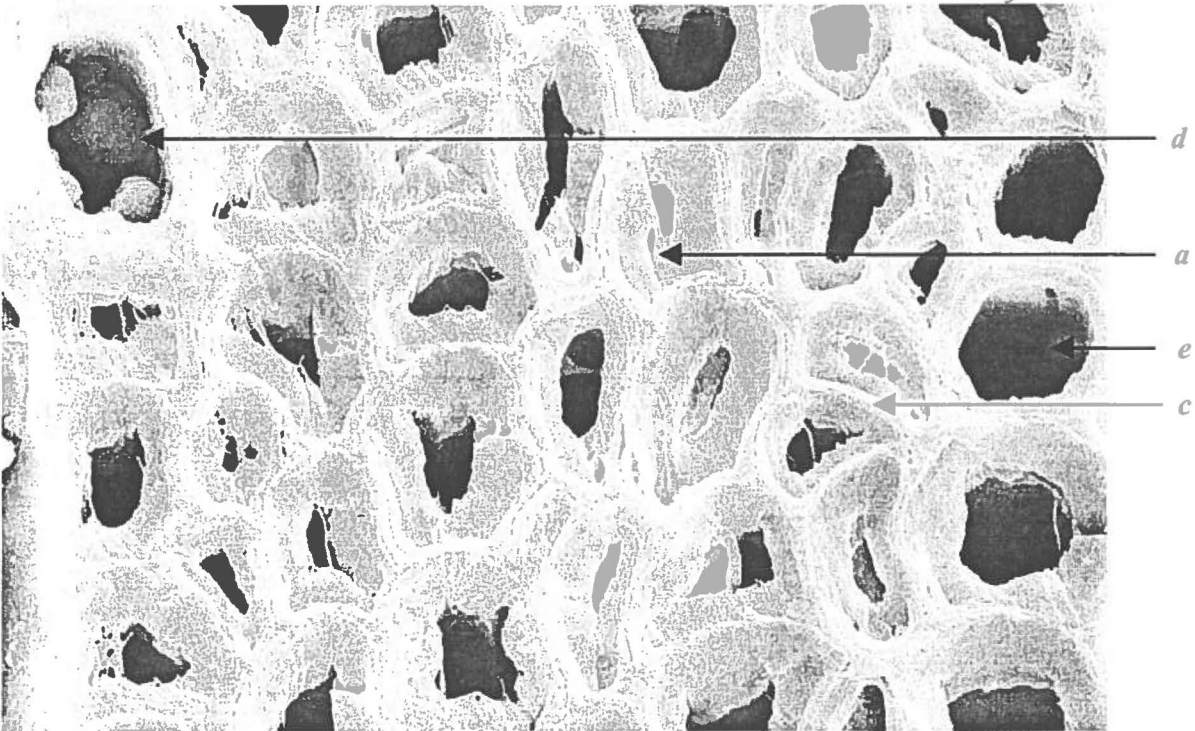
Les descripteurs X_{Ex} et Z_{Ex} indiquent l'excentricité relative de chaque cerne dans chacune des directions. Là encore, la composante X_{Ex} n'est pas significativement différente de 0, ce qui indique qu'il n'y a pas de direction latérale privilégiée pour l'excentricité. La composante Z_{Ex} est par contre significativement positive, ce qui indique que la croissance radiale est globalement plus intense dans le haut des sections que dans le bas. L'excentricité est plus intense pour le second cerne que pour le

Figures 108 et 109 : coupes transversales de bois de un an de 'Lambertin' et 'Palsteyn' vues en microscopie électronique à balayage. On y voit notamment des fibres G typiques (*a*) à paroi cellulósique épaissie, des fibres de bois normal (*e*), des vaisseaux (*b*) et du parenchyme vertical rempli de grains d'amidon (*d*). La lamelle mitoyenne séparant les cellules apparaît en plus clair (*c*).

Lambertin



Palsteyn



premier. Dans la suite de l'analyse, on négligera les composantes en X de l'excentricité et de la position du BT, pour se concentrer sur la composante en Z .

D'autre part, on a noté, sur l'ensemble des coupes, des corrélations significatives intéressantes entre descripteurs. Pour le second cerne, le pourcentage de BT est positivement corrélé à l'excentricité du cerne ($R=0.42$) et à la position du BT ($R=0.31$). L'excentricité du second cerne est positivement corrélée à celle du premier cerne ($R=0.62$).

4.3.2. Approche qualitative de la distribution longitudinale du BT sur 3 exemples

Les observations faites sur les coupes successives sont ici illustrées par l'analyse qualitative de la distribution du BT au sein d'un axe de chaque variété. Ces résultats ne prétendent pas à une valeur générale, mais permettent de se faire idée, par l'étude de trois exemples typiques, du type de distribution observé sur l'échantillon. Ils sont complétés au paragraphe suivant par une analyse quantitative.

➤ 'Lambertin' (L30)

La figure 110 montre, pour un axe de la variété 'Lambertin', l'ensemble des coupes réalisées à différents abscisses des axes (les zones de BT sont indiquées en noir). On voit que le BT se distribue en bandes localisées à différents niveaux dans les cernes annuels. En observant les coupes successives, on peut suivre l'évolution longitudinale d'une zone donnée. Les zones de BT sont en général continues sur plusieurs dizaines de centimètres. Par exemple, la première zone de BT du cerne 1999 (située dans le bois initial), est continue sur la quasi totalité de l'axe (on la retrouve jusqu'à l'abscisse 140). Eventuellement, leur position tangentielle et/ou leur extension peut varier progressivement d'une coupe à l'autre. Ainsi, les zones de BT les plus externes du cerne 1998 ont une extension tangentielle très importante à la base de l'axe (elle sont présentes sur les 4/5^{ième} du périmètre au niveau des coupes 20 et 30), qui se réduit à mesure que l'abscisse augmente. Dans le cerne 1999, le BT est bien localisé dans la moitié supérieure des coupes. Dans le cerne 1998, la localisation tangentielle est plus variable, et on observe notamment un secteur localisé latéralement (à gauche) en début de cerne, qui s'étend de l'abscisse 40 à l'abscisse 140. Notons enfin que, pour les deux cernes, la distribution du BT dans la partie terminale de l'axe est beaucoup moins conforme à la direction de la gravité : on voit en particulier à partir de 140 cm du BT situé en position latérale droite du cerne 1999.

On a représenté sur les figures 111abc l'évolution longitudinale des descripteurs du BT et de l'excentricité pour les deux cernes. Concernant le cerne 1998, on constate une variabilité relativement importante du pourcentage et de la localisation du BT, mais pas de tendance évidente en fonction de la position dans la pousse. Pour le cerne 1999, on ne voit pas de tendance marquante pour le pourcentage de BT, mais on constate que le descripteur de la position du BT diminue de la base vers l'apex (ce qui signifie que le BT est d'autant plus localisé en face supérieure qu'on se rapproche de la base). Pour les deux cernes, l'excentricité est légèrement négative en début de cerne et augmente régulièrement le long de l'axe, jusqu'à des valeurs positives. On note la bonne concordance entre l'excentricité des deux cernes.

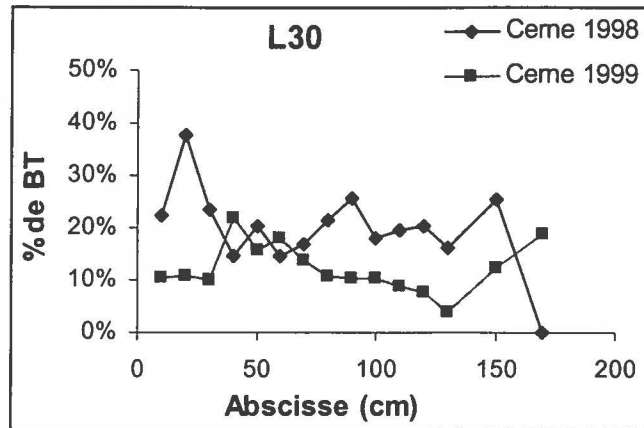
➤ 'Modesto' (M24)

La figure 112 fourni la représentation de coupes faites à différents niveaux pour un axe de la variété 'Modesto'. Le BT y est plus abondant que pour l'axe 'L30' vu précédemment, mais, du point de vue qualitatif, beaucoup remarques qui ont été faites restent valables :

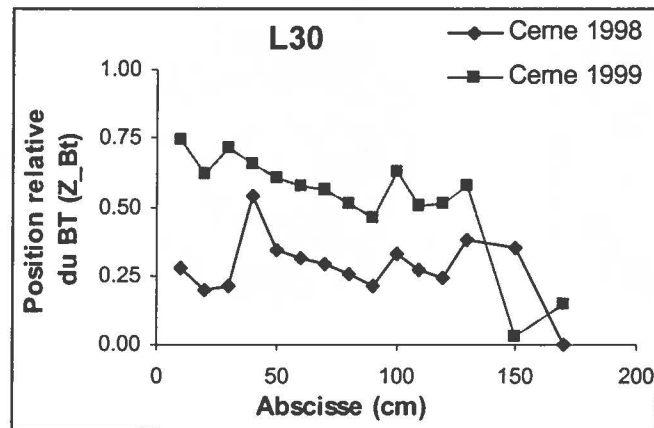
- le BT est situé à tous niveaux dans le cerne (bois initial et bois final).
- les zones sont continues sur plusieurs dizaines de centimètres dans la direction longitudinale.

Figures 111abc : distributions longitudinales du pourcentage de bois de tension (111a), de la position relative du bois de tension (111b) et de l'excentrement (111c) pour les cerne 1998 et 1999 de l'axe L30.

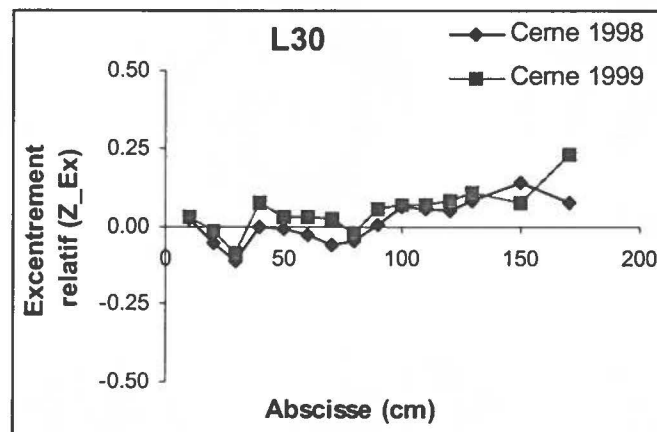
111a



111b

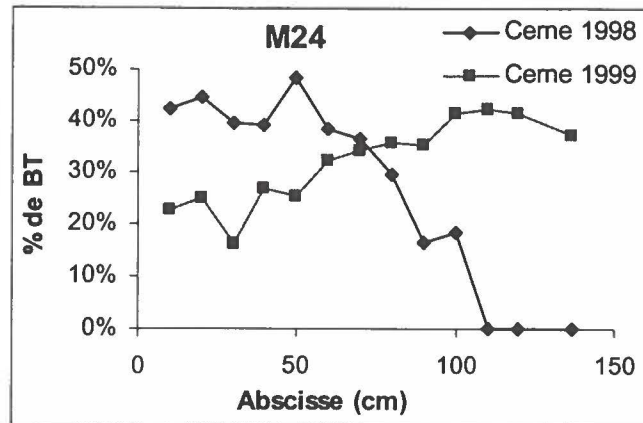


111c

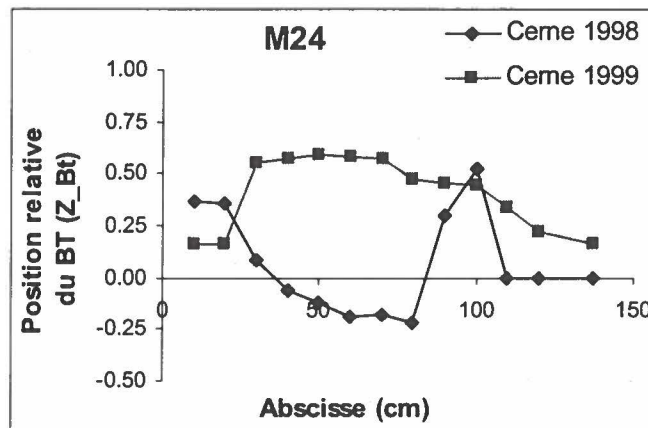


Figures 113abc : distributions longitudinales du pourcentage de bois de tension (113a), de la position relative du bois de tension (113b) et de l'excentrement (113c) pour les cernes 1998 et 1999 de l'axe M24.

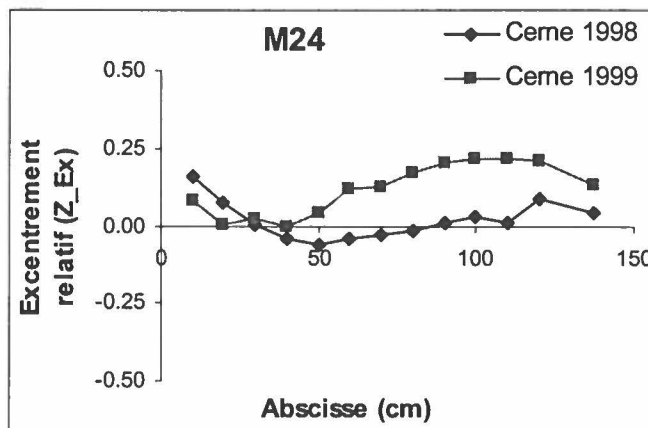
113a



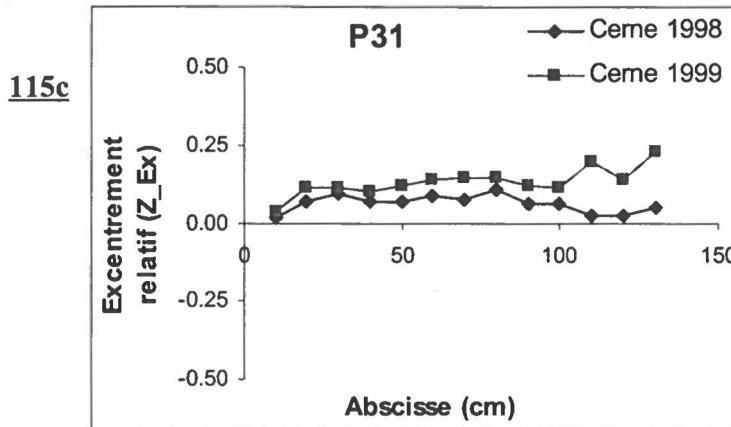
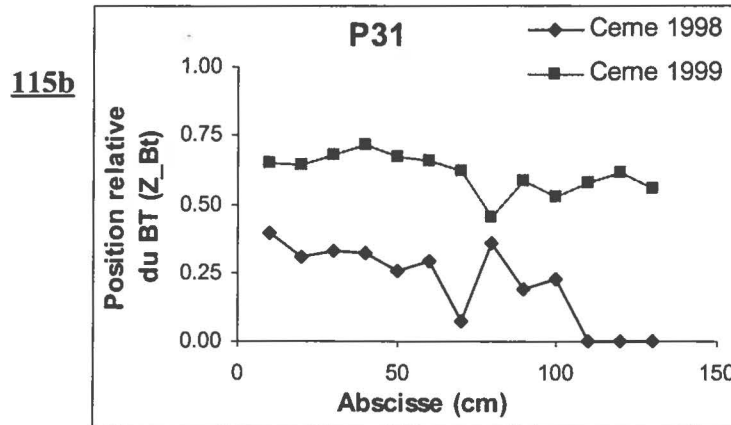
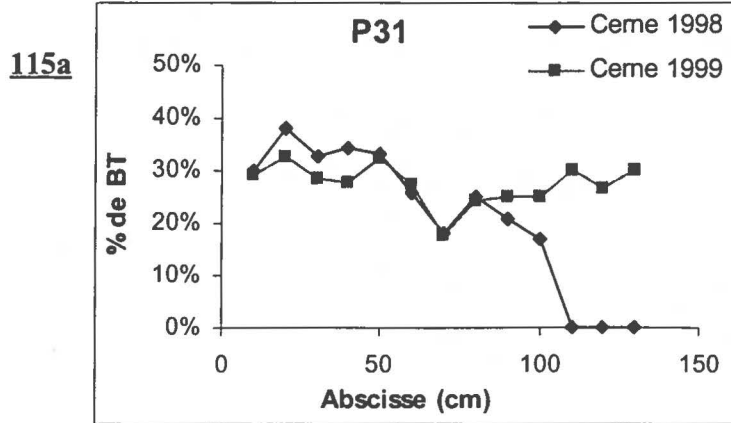
113b



113c



Figures 115abc : distributions longitudinales du pourcentage de bois de tension (115a), de la position relative du bois de tension (115b) et de l'excentrement (115c) pour les cerne 1998 et 1999 de l'axe P31.



- le BT est localisé dans la partie supérieure de la section, surtout pour le cerne 1999.
- la localisation est plus variable au niveau de la partie terminale.

Concernant la distribution tangentielle du BT, cet axe fournit un exemple intéressant où on voit alterner des secteurs en face supérieure (au début des cernes 1998 et 1999) et en face inférieure de l'axe (fin du cerne 1998). Ce type de distribution a déjà été observé et est attribué au « tâtonnement » de l'axe autour de la verticale (cet axe était effectivement très vertical début 1999). Les figures 113abc montrent, pour ce même axe, l'évolution des descripteurs en fonction de l'abscisse. Le pourcentage de BT a clairement tendance à diminuer de la base vers l'apex pour le cerne 1998, et à augmenter pour le cerne 1999. Pour le cerne 1998, la localisation du BT est très variable, avec des valeurs positives ou négatives. Pour le cerne 1999, le BT est localisé préférentiellement en partie supérieure, surtout au niveau de la partie médiane de l'axe. L'évolution de l'excentricité concorde bien pour les deux cernes : elle diminue sur le premier tiers de l'axe, puis augmente régulièrement.

➤ 'Palsteyn' (P31)

La figure 114 montre un troisième exemple de série de coupes, réalisées sur un axe de 'Palsteyn'. Les remarques qualitatives faites pour les deux autres axes observés sont confirmées. L'évolution des descripteurs est représentée pour cet axe sur les figures 115abc. Pour le cerne 1998, le pourcentage et la position du BT ont tous deux tendance à diminuer avec l'abscisse. L'excentricité reste par contre quasiment nulle. Pour le cerne 1999, aucune tendance n'est évidente pour ce qui concerne le pourcentage et la position du BT, et on constate une excentricité positive légèrement croissante.

4.3.3. Analyse quantitative de la distribution du BT : effet du cerne annuel, de la variété et de la position dans l'axe

➤ Echantillon étudié

Nous avons observé que la distribution du BT varie toujours assez progressivement d'une coupe à la suivante. Ceci implique que les coupes peuvent être pratiquées à intervalles plus espacés, tout en gardant l'essentiel de l'information. C'est ce qui a été fait avec d'autres axes de l'échantillon principal (10 par variété), pour lesquels on s'est contenté de trois coupes régulièrement espacées par axe (base – milieu – sommet). Pour la suite de l'analyse, nous nous sommes basés sur les données des deux échantillons (soit 15 axes par variété). Afin d'homogénéiser les variables étudiées et de donner le même poids à chaque axe dans l'analyse, nous n'avons conservé que trois coupes par axe de l'échantillon 'validation'. L'échantillon analysé est finalement constitué de 135 coupes (3 variétés × 3 positions × 15 répétitions).

➤ Détection des effets par analyse de variance

On a testé par analyse de variance l'effet du facteur « variété », l'effet du facteur « position dans l'axe » et leur interaction. Les tests ont été faits sur les trois descripteurs envisagés (pourcentage de BT, position du BT et excentricité), pour chaque cerne annuel. Le tableau 27 synthétise les résultats. L'effet « position dans l'axe » est significatif dans tous les cas, sauf pour le pourcentage de BT du cerne 1999. Le facteur « variété » a un effet significatif sur le pourcentage de BT les deux années. Il a un effet significatif sur la position du BT et l'excentricité pour le cerne 1999, mais pas pour le cerne 1998. L'interaction « position » / « variété » a été étudiée pour déterminer si les variétés ont des schémas de distribution longitudinale du BT différents. Cette interaction n'est significative pour aucun des cernes, et pour aucun des descripteurs.

➤ **Pourcentage de bois de tension**

Les moyennes pour le pourcentage de BT pour chaque position et chaque variété sont illustrées sur la figure 116 pour le cerne 1998, et sur la figure 117 pour le cerne 1999. Les intervalles de confiance des moyennes sont indiqués sous forme de barres d'erreur.

Pour le cerne 1998, les différences entre variétés sont assez faibles : les pourcentages de BT de 'Modesto' et 'Lambertin' ne diffèrent pas statistiquement, quelle que soit la position considérée. 'Palsteyn' est la variété qui a le plus fort pourcentage de BT sur ce cerne à toutes les positions, bien que la différence avec les autres variétés ne soit significative qu'au niveau du deuxième et du troisième tiers. Pour les trois variétés, la moyenne du pourcentage de BT est de l'ordre de 20% au niveau du premier tiers. Elle diminue ensuite de la base vers l'apex. La diminution est très rapide pour 'Lambertin' et 'Modesto' : le pourcentage vaut à peu près 12% en moyenne pour le tiers médian, et moins de 5% au niveau du tiers distal. Pour 'Palsteyn', la diminution est plus modérée : 18% en moyenne au niveau du tiers médian et près de 10% au niveau du tiers distal.

Pour le cerne 1999, l'effet de la position dans l'axe n'est significatif pour aucune des variétés, et le pourcentage de BT est sensiblement constant en moyenne le long de l'axe. Sa moyenne est comprise entre 25% et 30% pour les variétés 'Modesto' et 'Palsteyn'. Pour 'Lambertin', la moyenne, significativement inférieure à celle des autres variétés, est comprise entre 10% et 15%.

➤ **Position du bois de tension**

Les figures 118 et 119 illustrent les moyennes des positions du BT pour les deux cernes. On note peu de différence entre les variétés : 'Lambertin' a un BT localisé de façon moins polarisée que les autres variétés (valeur inférieure du descripteur Z_{BT}) au niveau du cerne 1999, mais cet effet est en limite de significativité statistique. La localisation du BT est, pour les trois variétés, beaucoup moins polarisée sur le cerne 1998 que sur le cerne 1999. Sur les deux cernes, et pour les trois variétés, le descripteur diminue de la base vers l'apex. Ceci confirme nos observations selon lesquelles la position du BT au niveau de la partie terminale de l'axe est faiblement liée à la direction de la pesanteur.

➤ **Excentricité**

Les figures 120 et 121 montrent les moyennes et intervalles de confiance des indices d'excentricité pour chaque cerne, par position et par variété. La moyenne de l'excentricité du cerne 1998 par rapport à la moelle est très faible en valeur absolue, quelle que soit la variété et la position considérée. Pour 'Lambertin', elle n'est pas significativement différente de 0. Elle est significativement positive pour 'Modesto' à toutes les positions, et pour 'Palsteyn' au niveau de la position médiane seulement.

La moyenne de l'excentricité du cerne 1999 par rapport au cerne 1998 est positive dans pratiquement tous les cas. Seul 'Lambertin' ne présente pas d'excentricité significative au niveau du tiers basal. Au niveau de toutes les positions, c'est 'Modesto' qui a l'excentricité la plus marquée.

➤ **Bilan**

Finalement, l'analyse fait ressortir trois points principaux :

- le BT est nettement plus abondant dans le cerne 1999 que dans le cerne 1998.
- la proportion de BT décroît de la base vers l'apex pour le premier cerne, et est indépendante de la position dans l'axe pour le second cerne.
- la variété 'Lambertin' produit moins de BT que les autres dans le cerne 1999.

4.3.4. Recherche de facteurs de différenciation de BT

➤ Echelle globale (axes)

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer si les différences de pourcentage de BT observées résultent de comportements intrinsèques des variétés ou si elles peuvent être interprétées indirectement par des relations causales avec d'hypothétiques facteurs de différenciation du BT. Pour cela nous avons étudié, sur les 45 axes, les corrélations entre leur pourcentage de BT moyen dans les cernes 1999 et différents descripteurs de leur croissance/flexion. De nombreux descripteurs ont été envisagés (cf. 1.1) : longueur de l'axe, diamètre moyen, volume total, masse des pousses, masse de pousses longues, masse des fruits, masse totale des charges, inclinaison moyenne et courbure totale. On a calculé la valeur de ces descripteurs, ainsi que les variations entre les différentes dates. La corrélation avec le pourcentage de BT a été trouvée significative pour les descripteurs suivants :

- diamètre moyen en début de saison ($R=-0.33$)
- inclinaison moyenne en fin de saison ($R=-0.36$)
- variation d'inclinaison moyenne entre le début de saison et la maturité ($R=-0.30$)
- variation d'inclinaison moyenne sur toute la saison ($R=-0.54$)
- courbure totale en fin de saison ($R=-0.38$)
- variation de courbure totale sur la saison ($R=-0.52$)

Les meilleures corrélations sont trouvées avec les variations de géométrie (inclinaison ou courbure) sur la saison. La figure 122 montre, pour les axes des trois variétés, une représentation conjointe du pourcentage de BT et de la variation d'inclinaison sur la saison. Ce facteur est le plus susceptible d'expliquer les différences de pourcentage de BT entre les axes. Le graphique montre cependant qu'une partie des différences observées entre les variétés ne peut pas être imputée aux variations de géométrie : pour les variations d'inclinaison faibles en valeur absolue, on voit clairement des différences de pourcentage de BT entre variétés. A variation d'inclinaison comparable, 'Lambertin' produit une quantité de BT deux à trois fois inférieure à celle des autres variétés.

Nous avons testé si, à variation d'inclinaison équivalente, les variétés produisent des pourcentages de BT statistiquement différents. Pour cela, l'effet « variété » a été testé par analyse de variance (ANCOVA), avec comme covariable la variation d'inclinaison moyenne sur toute la saison. L'analyse rejette vigoureusement ($p<0.001$) l'hypothèse d'absence d'effet « variété ». De façon analogue, les effets spécifiques de chaque variété ont été testés : l'effet « Lambertin » est très significatif ($p<0.0001$), et les effets des deux autres variétés ne sont pas significatifs au seuil de 5%. L'effet « Lambertin » est même plus important que l'effet variation d'inclinaison ($R^2=0.48$ contre $R^2=0.26$).

Il apparaît donc clairement que, indépendamment du facteur variation d'inclinaison, la variété 'Lambertin' produit significativement moins de BT que les autres.

➤ Echelle locale (segments)

Pour compléter l'analyse, nous avons cherché s'il existait des corrélations entre les descripteurs de la croissance/flexion à l'échelle locale et le pourcentage de BT dans les cernes 1999 des sections correspondantes. Cette analyse a été menée sur les 158 sections de l'échantillon 'validation'. Pour chaque section, les descripteurs locaux suivants ont été extraits : distance à la base de l'axe, distance à l'extrémité de l'axe, diamètre local, inclinaison locale, courbure locale, masse de pousses portées par le segment, masse de pousses portées par la partie avale de l'axe. On a extrait les descripteurs à chaque date, ainsi que leurs variations entre différentes dates. Les descripteurs significativement corrélés au pourcentage de BT local sont :

- la variation d'inclinaison locale sur la saison ($R=-0.44$)
- la variation de diamètre local entre le début de la saison et la récolte ($R=0.30$)
- l'inclinaison locale en fin de saison ($R=-0.29$)

La variable la mieux corrélée est, comme pour l'analyse globale, la variation d'inclinaison sur la saison. L'analyse de variance des effets variétaux sur le pourcentage de BT local, avec la variation d'inclinaison locale comme covariable, montre comme précédemment que l'effet 'Lambertin' est hautement significatif. On note que la corrélation à l'échelle locale (-0.44) est plus faible que la corrélation à l'échelle globale (-0.52).

4.4. Analyse de la distribution du BT dans les axes de l'essai d'arcure

Pour toutes les sections l'essai d'arcure mis en place en 1995 sur la variété 'Modesto', on a quantifié, pour chaque cerne :

- le pourcentage du BT (BT%)
- la position relative de centre de gravité du BT selon Z (Z_{BT})
- l'excentricité relative du cerne par rapport au précédent (Z_{Ex})

Les moyennes et intervalles de confiance de ces descripteurs sont rassemblés pour chaque modalité dans les tableaux 28abc. Les figures 124, 125 et 126 montrent, à titre d'illustration, les sections d'un axe de chaque modalité.

4.4.1. Intensité de la réaction en fonction des modalités

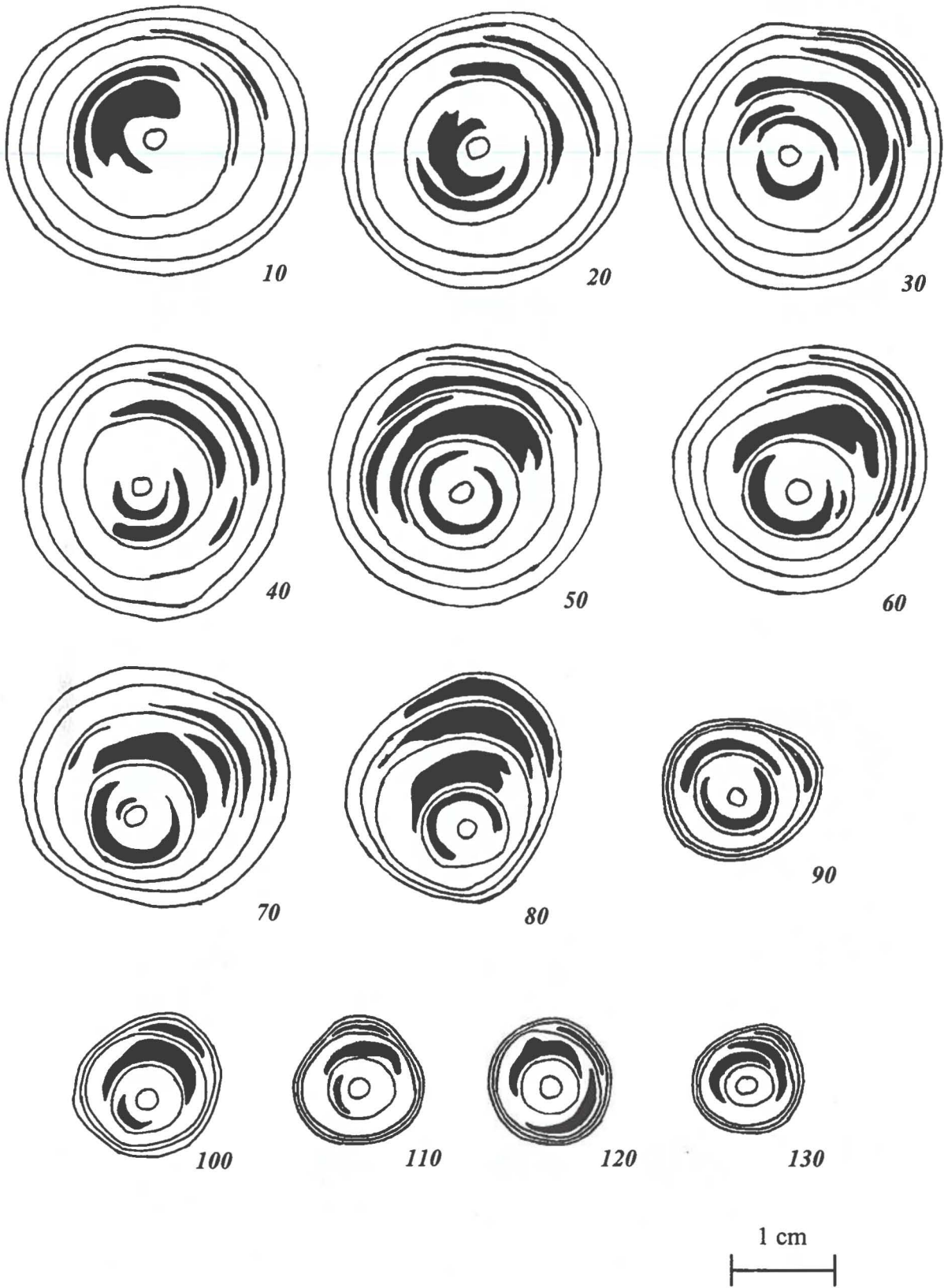
Les modalités de cette étude ont été constituées à partir d'un échantillon d'axes d'un an ayant des inclinaisons initiales peu différentes, toutes proches de la verticale. Les modalités diffèrent par l'intensité de la charge imposée, mais, compte tenu des charges utilisées (530 g et 840 g), les modalités « faible charge » et « forte charges » ne diffèrent pas significativement quand à leur inclinaison après arcure. Les descripteurs du cerne 95 (tableau 28b) quantifient la réaction anatomique l'année du traitement. Le pourcentage de BT produit cette année est en moyenne de 22% pour la modalité « forte charge », 20% pour la modalité « faible charge », et 10% pour les « témoins », ce qui est significativement inférieur aux autres modalités. La différence entre les deux modalités avec charge n'est pas significative. Etant donné qu'elle ne l'est pas non plus pour aucun des descripteurs étudiés, nous fusionnons ces deux modalités pour la suite de l'analyse. On conserve donc un échantillon « arqués » (constitué de 151 section provenant de 13 axes) et un échantillons « témoins » (210 section provenant de 14 axes).

Pour tous les axes, le BT est pratiquement toujours localisé dans la partie supérieure du cerne. La position du BT (Z_{BT}) n'est pas significativement différente entre les modalités. L'excentricité est significativement positive pour les axes arqués, et significativement négative pour les témoins.

4.4.2. Distribution longitudinale du BT

Les figures 124 à 126 permettent de reconstituer la distribution longitudinale du BT pour trois axes. L'observation des séries de coupes n'amène pas d'élément nouveau sur la distribution longitudinale du BT. Cette distribution est très variable entre les axes. Afin d'identifier les grandes tendances associées à chaque modalité, on a tracé, en fonction de la position dans l'axe, la moyenne du pourcentage de BT. Ces courbes, présentées sur la figure 123, ont été établies sur le cerne 95. Les intervalles de confiance des moyennes au seuil de 5% y sont représentés. On voit que, pour les témoins, la quantité de BT a une légère tendance à diminuer le long de l'axe. Pour les axes arqués, le pourcentage de BT ne diffère

Figure 125 : distribution du bois de tension dans l'axe RO09.



significativement de celui des témoins ni dans la partie basale, ni dans la partie terminale des axes. En revanche, le pourcentage est significativement plus élevé dans une large partie médiane de l'axe.

4.4.3. Réaction à long terme

La comparaison des moyennes des descripteurs pour les cernes 96 et 97 nous permet de voir dans quelle mesure la réaction se poursuit à long terme après imposition de l'arcure.

Pour les témoins, le pourcentage de BT sur le cerne 96 (10%) ne diffère pas du cerne 95. La quantité observée sur le cerne 97 est significativement inférieure (5%). Pour les axes arqués, les pourcentages valent 11% pour le cerne 96 et 5% pour le cerne 97. Pour ces deux années, les pourcentages de BT ne diffèrent pas entre les modalités. La réaction observée sur le cerne 95 (21%) apparaît donc comme limitée à l'année du traitement.

La position du BT ne diffère pas non plus entre les axes arqués et témoins. L'indice de position augmente des cernes les plus anciens vers les cernes les plus récents, ce qui indique que le BT produit est localisé dans le haut des cernes, de façon de plus en plus polarisée.

Concernant l'excentricité, les modalités présentent des différences significatives. Pour les axes arqués, l'excentricité est de plus en plus positive. Pour les témoins, l'excentricité était significativement négative en 95 ; elle le reste en 96, bien qu'elle ait significativement augmenté. En 97, l'excentricité n'est pas significativement différente de 0.

Par ailleurs, la position radiale du BT dans les cernes a été observée. Dans les cernes 94 et 95, on a observé, conformément aux observations faites sur les autres axes, que le BT est présent à tous les niveaux du cerne (bois initial ou final). Par contre, pour les cernes 96 et 97, le BT est plus fréquemment situé en début de cerne (voir figures 124 à 126).

4.4.4. Recherche d'un facteur de différenciation du BT

Le pourcentage de BT observé dans le cerne 95 a été mis en relation avec différents facteurs susceptibles d'y être reliés. Ces facteurs sont quantifiés par des mesures faites pendant l'année 1995. Nous avons envisagé les facteurs suivants :

- inclinaison moyenne de l'axe avant arcure (en °)
- inclinaison moyenne de l'axe après arcure (en °)
- variation d'inclinaison lors de l'arcure (= différence entre les deux précédents)
- longueur de l'axe (en cm)
- volume de l'axe début 1995 (en cm³)
- volume de l'axe fin 1995 (en cm³)
- variation de volume de l'axe (= différence entre les deux précédents)
- indice de ramification (= somme des longueurs des pousses, en cm)

Ces descripteurs ont été mis en relation avec le pourcentage moyen de BT par axe. Des corrélations significatives ont été trouvées entre le pourcentage moyen de BT par axe et l'inclinaison après arcure ($R=-0.77$), la variation d'inclinaison ($R=-0.76$), le volume en fin de saison ($R=-0.56$) et la variation de volume ($R=-0.59$). Ces variables sont deux à deux très bien corrélées ($R=0.97$ entre l'inclinaison après arcure et la variation d'inclinaison ; $R=0.99$ entre le volume final et la variation de volume). Nous ne conserverons donc pour la suite de l'analyse que la variation d'inclinaison et la variation de volume.

D'autre part, la variation de volume de l'axe est elle-même corrélée à la variation d'inclinaison ($R=0.66$). Ceci s'explique par le fait que les axes arqués sont pénalisés du point de vue de la

croissance (Wareing et Nasr 1961), et ont donc une croissance diamétrale réduite (le tableau 29 indique les diamètres moyens de chaque modalité, en 1995, 1996 et 1998). Il paraît donc vraisemblable que la corrélation trouvée entre le pourcentage de BT et la variation de volume soit un effet indirect de la variation d'inclinaison. Pour le vérifier, nous avons comparé la part de variance expliquée par différents modèles de régression. La variable à expliquer est le pourcentage moyen de BT. Les variables explicatives sont la variation de volume seule, la variation d'inclinaison seule, et les deux ensembles. Les coefficients de détermination associés à ces relations valent respectivement $R^2=0.35$, $R^2=0.59$ et $R^2=0.61$. La différence entre les coefficients de détermination des deux dernières relations n'est pas significative. Ceci signifie qu'une fois la variation d'inclinaison prise en compte, l'effet de la variation de volume n'est plus significatif. La variation d'inclinaison semble donc, comme dans le cas des autres axes étudiés, être le facteur le plus satisfaisant pour expliquer le pourcentage de BT produit. La figure 127 représente conjointement ce descripteur et le pourcentage de BT, pour les axes des trois modalités.

4.5. Bilan

De l'analyse de la distribution du bois de tension dans les différents échantillons ressortent quelques points essentiels :

- Le bois de tension est présent dans la quasi-totalité des coupes observées.
- Il est en règle générale situé dans le haut des sections.
- Le facteur le mieux corrélé au pourcentage de bois de tension est la variation d'inclinaison
- A variation d'inclinaison égale, la variété 'Lambertin' produit un pourcentage de bois de tension inférieur aux variétés 'Modesto' et 'Palsteyn'.

Partie V- Validation et exploitation des modèles mécaniques

Cette partie présente l'application des modèles mécaniques aux données collectées qui ont été présentées dans la partie IV.

Le premier chapitre est consacré à la validation du modèle mécanique tenant compte de toute l'information collectée (à l'échelle locale), par confrontation entre les sorties du modèle et les mesures réalisées. Le modèle sera d'abord évalué dans un contexte où la croissance est négligée. L'effet de la croissance diamétrale et des réorientations actives seront ensuite intégrées dans l'évaluation. On s'intéressera notamment à l'adéquation des modèles mis en œuvre, au choix et à la pertinence des hypothèses sous-jacentes, ainsi qu'aux implications des résultats.

Dans le second chapitre, la théorie mécanique sera exploitée pour construire des indicateurs synthétiques, basés sur des données à l'échelle de l'axe. Ces indicateurs se basent sur une quantité d'information plus limitées (quelques données globales). Ils permettront de quantifier l'importance relative de chacun des phénomènes impliqués dans la détermination de la forme des axes.

Les résultats seront interprétés et partiellement discutés dans cette partie. La détermination des facteurs prépondérants dans l'établissement du port de chaque variété sera discutée à la fin du chapitre 2. La mise en perspective des résultats, et la comparaison de la démarche avec des travaux préexistants dans la littérature est différée à la partie VI.

V-1. Validation du modèle basé sur des données locales

1.1. Validation du modèle hors croissance diamétrale (*ModelMeca2.1*)

Le travail présenté dans cette section a donné lieu à un article publié dans la revue « *Trees : structure and function* » sous le titre « *Bending of apricot-tree branches under the weight of axillary productions : confrontation of a mechanical model to experimental data* » (Alméras, Gril et Costes 2001). Le texte intégral de l'article est fourni en annexe 10.

1.1.1. Principe de la démarche de validation

L'objectif de la validation telle que nous l'entendons est de vérifier si la théorie permet de prévoir quantitativement le comportement réel des axes. Précisons d'emblée que les théories mécaniques, et notamment la théorie des poutres, sont très largement éprouvées dans le domaine de l'ingénierie et n'ont pas en soi besoin d'être validées. Ce que nous cherchons à valider, c'est leur utilisation dans un contexte biologique pour lequel les données du problème (géométrie de la structure, comportement des matériaux et sollicitations) sont complexes et non parfaitement maîtrisées.

La question est : compte tenu de données mesurées à une certaine échelle sur une structure, avec une certaine précision, et étant donné un certain nombre d'hypothèses mécaniques, est-ce que les déformations simulées par la théorie concordent avec celles qui ont été observées directement ?

La concordance entre les déformations simulées et les déformations observées constitue une validation du modèle dans la mesure où les informations fournies au modèle proviennent de mesures indépendantes (c'est à dire qu'elles ne dépendent pas elles-mêmes du modèle). Notamment, la concordance entre le modèle et la réalité après ajustement d'un paramètre quantitatif ne constitue pas, à mon sens, une validation du modèle au sens le plus strict du terme. Une telle démarche a été présentée au IV-2.2 dans le cadre d'essais de flexion imposée. L'ajustement a permis d'estimer le module de structure et de constater la bonne qualité des simulations.

D'autre part, notons que la concordance entre le modèle et la réalité n'est jamais totale. Un modèle (même mécaniste), qui est par essence une représentation simplifiée de la réalité, ne peut pas rendre compte intégralement de la complexité du réel (Cruziat et Génard 1998). La validité d'un modèle est donc toujours partielle, et peut être quantifiée par une mesure de l'adéquation entre simulations et observations. Nous emploierons donc, à la suite d'autres auteurs, le terme d'« évaluation » du modèle.

Enfin, la mise en œuvre du modèle mécanique implique de faire le choix d'un certain nombre d'hypothèses. Les sorties du modèle, et leur adéquation à la réalité, dépendent de ces choix. Notre démarche de validation consistera donc à évaluer l'adéquation du modèle sous différentes hypothèses, à faire le choix des hypothèses les plus pertinentes, et à discuter les causes possibles des inadéquations résiduelles.

1.1.2. Matériel et méthodes

L'évaluation du modèle hors croissance diamétrale (*ModelMeca2.1*, présenté à la partie II) a été réalisée sur l'échantillon 'validation' à partir des données mesurées pendant la période comprise entre les dates 0 et 1 telles que définies à la partie IV. Nous avons établi que la croissance en diamètre était très faible pendant cette période, alors que l'accroissement pondéral est rapide. Cette période nous est donc apparue intéressante pour évaluer le modèle en simulant la flexion sous le poids des axillaires (dans un contexte où la croissance en diamètre est négligée), et en la comparant à la flexion observée.

La charge totale à la date 1 et l'inertie moyenne en flexion aux deux dates (descripteurs MTOT1, IMOY0 et IMOY1 définis au IV-1.1) de chacun des axes sont précisées à titre indicatif dans le tableau 1.

➤ **Données locales**

Les données fournies au modèle pour les simulations sont la géométrie et la morphologie initiale (orientation et diamètre des segments à la date 0), et le chargement final (masse associée à chaque segment à la date 1). On a aussi tenu compte d'une éventuelle variation de l'inclinaison à la base liée à la rotation de la structure porteuse en fournissant au modèle l'inclinaison à la base des axes à la date 1.

Afin d'adapter les données au format d'entrée du modèle, différentes opérations ont été réalisées :

- la géométrie des axes a été mesurée dans l'espace, alors que le modèle travaille à partir d'une formulation plane du problème. Les coordonnées des points mesurés ont donc été projetées dans un plan vertical à l'aide du programme *convertG.exe* présenté au II-2.3.5.
- les données ont été relevées avec un pas de discrétisation fixe de 5cm, alors que le modèle travaille avec une discrétisation en 50 éléments. Pour palier à ce problème, les données ont été interpolées linéairement grâce au programme *BaseDo.exe* afin d'adapter le pas de discrétisation.

➤ **Module d'élasticité**

Etant donné que les axes ont été impliqués dans un suivi sur toute l'année, il n'a pas été possible de les prélever à la date 1 pour déterminer de façon indépendante la valeur du module d'élasticité au niveau de chaque segment. Les simulations sont donc basées sur la valeur de structure du module d'élasticité mesurée *in situ*, en supposant que les propriétés matérielles sont homogènes le long des axes.

Pour chaque axe, deux séries de simulations ont été réalisées avec des valeurs distinctes de module de structure. Les premières valeurs sont celles obtenues à partir des essais de flexion instantanée *in situ* pour chaque axe de l'échantillon 'validation', présentés au paragraphe 2.2.1 de la partie IV. Ces valeurs seront désignées par le symbole E^0 .

La seconde série de valeurs a été déterminée pour prendre en compte les effets visco-élastiques en tenant compte de la dynamique de chargement.

➤ **Prise en compte de la visco-élasticité**

On sait que le matériau bois a, dans le cas général, un comportement visco-élastique (Kollmann et Côté 1968). Ceci se traduit par le fait que les déformations consécutives à une sollicitation donnée varient au cours du temps. Pour en tenir compte, il faut connaître l'évolution temporelle des propriétés des matériaux caractérisée par la loi $E(t)$. La déformation au temps t_1 d'un élément soumis à un moment ΔM depuis t_0 s'écrit alors :

$$\Delta C(t_1) = \Delta M / E(t_1-t_0)I$$

La déformation au temps t_1 est équivalente à la déformation instantanée d'un matériau purement élastique de module d'élasticité $E(t_1-t_0)$. Le temps n'intervenant pas explicitement dans notre modèle, la visco-élasticité sera prise en compte par l'intermédiaire d'un module de structure équivalent à la date finale. Le calcul de ce module fait intervenir la dynamique de chargement et la loi $E(t)$, et est basé sur le principe de superposition (Lemaitre et Chaboche 1985).

Soit un élément de poutre d'inertie I soumis à différentes dates $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_f$ à des chargements permanents caractérisés par leurs moments $\Delta M_1, \Delta M_2, \dots, \Delta M_k, \dots, \Delta M_f$. Au temps t_f , l'incrément de courbure de l'élément causé par la charge ajoutée à t_k vaut :

$$\Delta C_k(t_f) = \Delta M_k / E(t_f-t_k)I$$

L'incrément de courbure causé par toutes les charges vaut :

$$\Delta C(t_f) = \Sigma(\Delta C_k(t_f)) = \Sigma(\Delta M_k / E(t_f - t_k) I)$$

Le module l'élasticité équivalent à t_f vaut :

$$E^{eq} = \Delta M / I \Delta C(t_f)$$

où $\Delta M = \Sigma(\Delta M_k)$ désigne le moment total des forces imposées à l'élément.

Le module équivalent s'écrit finalement :

$$E^{eq} = \Delta M / \Sigma(\Delta M_k / E(t_f - t_k)) \quad (\text{équation 66})$$

La loi $E(t)$ a été évaluée en fonction de $E(t_0)$ pour chaque variété au paragraphe 2.2.2 de la partie IV. Elle a été évaluée pour chaque axe en identifiant $E(t_0)$ aux mesures de module de structure instantané E^0 . Les modules d'élasticité équivalents à la date 1, E^{eq} , ont alors été calculés grâce à l'équation 66, pour chaque axe, en tenant compte de la dynamique réelle de chargement. Le calcul a été fait en se basant sur les incréments hebdomadaires de charge. Les modules visco-élastiques équivalents sont reportés dans le tableau 2.

➤ Mise en œuvre des simulations

Deux hypothèses ont été testées lors de la validation du modèle : l'hypothèse de petites perturbations (HPP), et la négligeabilité du comportement visco-élastique des axes. Pour cela, trois séries de simulations ont été mises en œuvre, avec des jeux d'hypothèses différents :

- HPP et module de structure instantané E^0
- Calcul en grands déplacements et module de structure instantané E^0
- Calcul en grands déplacements et module tenant compte de la visco-élasticité E^{eq}

➤ Critères d'évaluation du modèle

La qualité des simulations a été évaluée en comparant les sorties du modèle aux données de géométrie mesurées à la date 1. Au niveau d'un axe, la flexion a été quantifiée par la variation d'inclinaison moyenne²¹. Nous avons distingué trois niveaux d'approche pour juger de la qualité des modèles mis en œuvre :

- *le niveau global*, constitué par l'ensemble de l'échantillon. Les erreurs détectées à ce niveau reflètent une insuffisance globale du modèle, peu dépendante des caractéristiques individuelles des axes. Il est possible d'en juger en comparant la valeur moyenne des variations d'inclinaisons simulées et observées, ou, de façon pratiquement équivalente, en comparant à 1 les pentes des droites de régression forcées à l'origine obtenues à partir de ces valeurs. La pente de la régression des valeurs simulées en fonction des valeurs observées sera noté a .
- *le niveau individuel*, relatif à la simulation de la flexion de chaque axe. Les erreurs détectées à ce niveau résultent d'une mauvaise prise en compte par le modèle de caractéristiques propres à certains axes. Elles génèrent une plus grande dispersion des points dans les diagrammes comparant les variations d'inclinaisons simulées et observées, qui se traduit par une diminution de la corrélation entre les variations d'inclinaison simulées et observées. L'adéquation à ce niveau sera mesurée par le carré du coefficient de corrélation linéaire, noté R^2 .

²¹ à ne pas confondre avec la variation d'inclinaison de l'extrémité, utilisée comme quantificateur de la flexion dans d'autres parties de ce mémoire (on rappelle que la variation d'inclinaison moyenne est approximativement égale à la moitié de celle de l'extrémité). Le lecteur est prié de m'excuser pour cette petite gymnastique...

- *le niveau local*, relatif à la déformation des différentes parties d'un même axe. Les erreurs faites à ce niveau ne peuvent pas être révélées par la comparaison des variations d'inclinaisons simulées et observées (qui sont, par définition, moyennées sur tout l'axe). Il est possible que la simulation de la variation d'inclinaison d'un axe soit de bonne qualité, sans que la forme simulée corresponde localement à la forme observée. On peut juger de ces effets pour chaque axe en comparant localement la forme simulée et la forme observée, à condition que les erreurs individuelles et globales ne les masquent pas.

1.1.3. Discrimination des hypothèses pertinentes

Les résultats des simulations ont été établis pour tous les axes de l'échantillon de validation, soit 5 par variété. Ces résultats sont présentés pour l'ensemble de l'échantillon et illustrés pour un axe type par variété (L23, M24 et P40). Les figures 4-abc, 5-abc et 6-abc représentent les résultats des simulations pour ces axes types. Afin de faciliter la comparaison d'axes de longueurs différentes, l'échelle de tous les graphiques a été adimensionnée en divisant par longueur totale des axes. Les figures 1,2,3 montrent conjointement, pour tous les axes, les variations d'inclinaison simulées et mesurées. Les pentes a et les corrélations R^2 sont indiquées sur les graphes.

➤ Inadéquation de l'HPP et prise en compte de grands déplacements

La comparaison entre les simulations sous HPP et les simulations en grands déplacements (figures 4abc et 5abc) montrent clairement l'inadéquation de l'hypothèse de petites perturbations. Dans les deux cas, la variation d'inclinaison est globalement sous évaluée par le modèle. Sous HPP, elle est sous-évaluée de 48% en moyenne ($a=0.56$), alors qu'en tenant compte de l'effet des grands déplacements elle n'est plus sous-évaluée que de 29% en moyenne ($a=0.69$).

L'effet de l'HPP est cependant plus complexe qu'une sous-évaluation systématique, comme on peut le voir en comparant les figures 4c et 5c. Pour cet axe, la variation d'inclinaison calculée sous HPP est supérieure à celle calculée en grands déplacements. L'effet de l'HPP dépend en réalité non seulement de l'ordre de grandeur de la déformation, mais aussi de l'orientation initiale de l'axe (ce fait a été introduit lors de l'étude théorique II-2.2.4, cf. figure II.30). Plus l'axe est vertical, plus l'erreur est importante. Si l'axe passe sous l'horizontale, la flexion crée une diminution du bras de levier, et la flexion calculée en grands déplacements est inférieure à celle calculée sous HPP. Il en résulte que cette hypothèse induit non seulement une erreur globale sur la moyenne des variations d'inclinaisons estimées, mais aussi une plus grande dispersion des erreurs individuelles. Cet effet se traduit par un coefficient de corrélation entre variation d'inclinaison observée et simulée sous HPP ($R^2=0.58$) inférieur à celui obtenu en grands déplacements ($R^2=0.66$).

➤ Amélioration liée à la prise en compte de la visco-élasticité

La prise en compte du comportement visco-élastique des axes nous a amené à diminuer les valeurs de module de 15% en moyenne (cf. tableau 2). Les variations d'inclinaison simulées avec cette valeur (fig. 6-abc) restent sous-évaluées en moyenne par rapport à celles qui ont été observées, mais de seulement 14% ($a=0.80$) à comparer à une sous-évaluation de 29% ($a=0.69$) obtenue avec les valeurs de modules instantanés, ce qui constitue une amélioration globale substantielle.

Notons que la méthode que nous avons mise en œuvre se borne à une prise en compte globale des effets visco-élastiques, basée sur des lois de variation temporelle du module établies par variété. Elle ne permet pas de détecter les éventuelles spécificités individuelles concernant ce comportement. Ceci explique pourquoi le coefficient de corrélation, qui mesure l'adéquation individuelle, n'est pas amélioré par cette correction.

➤ **Origine possible de la sous-estimation résiduelle de la flexion**

Le fait que, pour la plupart des axes, la variation d'inclinaison reste sous-estimée par le modèle peut être expliqué par des causes diverses, tenant autant à la qualité des données d'entrée qu'à la qualité du modèle lui-même. Trois types de causes possibles ont retenu notre attention :

- *La spécification du chargement* : (1) le chargement des axes a été évalué de façon indirecte par des lois d'allométrie. L'incertitude finale sur la charge est relativement importante (environ 10%), mais ne devrait pas être biaisée dans la mesure où ces lois ont été établies sur un échantillon représentatif. Ce facteur ne peut donc pas être responsable de la sous-estimation globale de la flexion, mais peut expliquer les écarts individuels. (2) Nous avons considéré que les chargements associés aux segments étaient ponctuels, ce qui a pour effet de négliger le bras de levier des pousses longues. Cet effet provoque automatiquement une sous-estimation de la flexion pour les individus présentant de telles pousses. Il est donc susceptible d'induire la sous-estimation observée, à la fois au niveau global et individuel. Cependant, ces pousses représentent une faible part de la charge et leur longueur n'excède pas 25 cm sur les axes en question. Des calculs faits par ailleurs montrent qu'ils ne peuvent expliquer qu'une part de l'erreur constatée.
- *Les hypothèses sur les propriétés du matériau* : (1) nous avons supposé que les propriétés matérielles sont homogènes le long des axes. Cette hypothèse ne peut être responsable des erreurs constatées ni au niveau global, ni au niveau individuel, car la détermination du module de structure a été elle-même réalisée sous ces hypothèses pour chaque individu. (2) Le modèle suppose une constance dans le temps des propriétés matérielles. En dehors du problème posé par la croissance (abordée dans le point suivant), il est difficile d'incriminer cette hypothèse au niveau global : les effets visco-élastiques ont été pris en compte, et il est reconnu que la constitution du bois en place n'évolue pratiquement pas après lignification (Jodin 1994). Par contre, comme nous l'avons déjà souligné, les écarts individuels peuvent être dus à des différences individuelles de propriétés visco-élastiques.
- *L'hypothèse de croissance radiale nulle sur la période* : la croissance radiale n'est en réalité pas strictement nulle : l'accroissement de diamètre sur la période représentant de 1 % à 10 % du diamètre initial. Les nouveaux tissus mis en place ont potentiellement trois effets, qui agissent dans des sens différents : (1) ils agissent comme une charge supplémentaire qui pourrait expliquer l'erreur commise. (2) Une fois lignifiés, ils participent au soutien de l'axe. Dans ce cas, le fait de les négliger devrait mener à une flexion surestimée, et cet effet ne peut donc pas être responsable des inadéquations constatées. (3) Lors de leur lignification, les déformations de maturation peuvent expliquer un léger redressement de l'axe. Là encore, cet effet devrait résulter en une flexion surestimée, et ne peut donc pas être incriminé.

La prise en compte de ces effets sera envisagée à la section 1.2.

1.1.4. Elimination des effets globaux et individuels par ajustement du module

➤ **Ajustement du module d'élasticité**

Pour pouvoir juger des erreurs locales commises par le modèle, nous avons corrigé les erreurs individuelles en ajustant le module d'élasticité. Pour cela, nous avons déterminé, pour chaque axe, la valeur du module qui minimise la distance entre la configuration simulée et la configuration mesurée. Cette valeur a été déterminée avec la procédure d'ajustement de paramètre (minimisant la somme des carrés des distances pour chaque point) intégrée à *ModelMeca2.1*, introduite au II-2.3.3. Soulignons que la valeur ainsi déterminée intègre des erreurs provenant de l'ensemble des phénomènes non pris

en compte par le modèle. Elle ne constitue donc pas *a priori* une estimation des propriétés mécaniques du bois meilleure que celle déterminée par essai de flexion.

Les figures 7abc montrent les résultats des simulations à partir du module de structure ajusté pour les trois axes types. Le tableau 2 donne la valeur du module ajusté pour chacun des axes, ainsi que la distance moyenne entre les points de la configuration mesurée et ceux de la configuration simulée après ajustement.

Dans 8 cas sur 15, la distance moyenne est inférieure au centimètre et la configuration simulée est pratiquement indiscernable de la configuration mesurée. La qualité des simulations avec un seul paramètre ajusté montre que le modèle est en mesure de rendre compte localement de l'essentiel des phénomènes en cause. Cependant, dans 5 des cas étudiés, la différence entre la configuration ajustée et la configuration mesurée reste notable (voir notamment la figure 7c). Les inadéquations ne peuvent être attribuées qu'à des effets locaux non pris en compte par le modèle, puisque l'ajustement sur le module corrige l'ensemble des effets à l'échelle individuelle et locale.

➤ Origines possibles des erreurs locales résiduelles

Comme au paragraphe précédent, trois causes possibles ont été retenues pour expliquer la différence entre la forme des axes simulée par le modèle après ajustement et la forme mesurée :

- *La spécification du chargement* : le fait de négliger le bras de levier des pousses longues n'a pas un effet homogène le long des axes. En effet, ces pousses sont le plus souvent situées en position distale sur les axes. L'incrément de moment lié au bras de levier supplémentaire a un effet plus important sur les parties distales que sur les parties basales.
- *Les hypothèses sur les propriétés du matériau* : nous avons considéré que les axes étaient constitués d'un matériau dont les propriétés élastiques sont homogènes. Par ailleurs, les mesures de module d'élasticité faites sur des échantillons prélevés à différents abscisses des axes (présentées au IV-2.1) montrent que le module d'élasticité ne présente pas de corrélation significative avec la position dans la pousse annuelle, ce qui justifie l'utilisation d'une valeur de structure. Une variation longitudinale du module est cependant probable pour certains axes. Dans le cas de la figure 7c, la mauvaise qualité de la simulation après ajustement du module pourrait être attribuée à une diminution du module le long de l'axe, qui se traduit par une flexion sous-estimée dans la partie basale de l'axe, et par une flexion surestimée dans sa partie terminale.
- *L'hypothèse de croissance radiale nulle sur la période* : son effet a été commenté lors de l'analyse à l'échelle globale et individuelle. Il est théoriquement intégré lors de l'ajustement du module, mais on ne peut exclure une hétérogénéité longitudinale de la croissance radiale, qui pourrait être la cause des inadéquations locales constatées.

1.1.5. Bilan

Quelques points essentiels se dégagent de l'évaluation du modèle hors croissance :

- la prise en compte des grands déplacements est nécessaire pour rendre compte de la flexion sur la période considérée.
- la prise en compte de la visco-élasticité amène à faire une correction à la baisse d'environ 15% du module d'élasticité, et améliore nettement la qualité des simulations.
- malgré la prise en compte des grands déplacements et de la visco-élasticité, le modèle sous-estime encore la variation d'inclinaison d'environ 15% en moyenne. Cette erreur peut dans une large mesure être attribuée au fait de négliger le bras de levier des pousses longues.

- après ajustement du module, les formes simulées sont dans l'ensemble très proches des formes observées.
- les inadéquation résiduelles au niveau local peuvent être attribuées à une variation longitudinale des propriétés matérielles et à la présence de pousses longues.

1.2. Validation du modèle avec croissance diamétrale (*ModelMeca2.2*)

Il n'a pas été possible d'envisager pour le modèle avec croissance diamétrale une démarche de validation strictement similaire à celle qui vient d'être présentée, car certains paramètres du modèle n'ont pas pu être mesurés de façon indépendante. C'est le cas des paramètres qui conditionnent le processus de maturation du bois, tels que les lois de réorientation (cf. II-3.3.2) et le délai de lignification. Il n'est donc pas possible de « valider » le modèle, au sens le plus stricte du terme. Nous étudierons cependant son comportement en comparant les formes simulées aux formes observées aux dates clés introduites au chapitre IV-1.

Concernant les paramètres de maturation, nous procéderons en trois temps :

- les simulations seront d'abord réalisées en les fixant à une valeur nulle, c'est à dire en négligeant les délais de lignification et les déformations de maturation (1.2.1).
- l'effet de ces paramètres sera ensuite étudié sur quelques cas particuliers, afin d'orienter le choix des valeurs à imposer (1.2.2).
- enfin, on réalisera des simulations complètes à partir de valeurs arbitraires mais réalistes de ces paramètres (1.2.3). Différents jeux de paramètres seront testés et comparés, pour essayer d'obtenir la meilleure adéquation possible.

L'ajustement sera réalisé visuellement et non à l'aide de la procédure d'ajustement automatique de paramètres, pour plusieurs raisons. D'une part, la procédure intégrée ne permet pas l'ajustement simultané de plusieurs paramètres. D'autre part, celle-ci se base sur une distance entre forme simulée et forme observée à la date finale. Des essais d'ajustement automatique sur un paramètre ont montré qu'alors l'adéquation aux dates intermédiaires était souvent très mauvaise. L'ajustement visuel permet de trouver un compromis satisfaisant sur l'ensemble de la saison.

En dehors de ces paramètres non mesurés, toutes les informations fournies au modèle proviennent directement des données mesurées tout au long de la saison. Ces données sont, pour chaque segment, l'inclinaison initiale et les diamètres et charges à chaque semaine. Elles ont été extraites à l'aide des programmes *ConvertG.exe* et *BaseDo.exe*.

Comme au 1.1, les déformations subies par les axes entre deux dates données sont quantifiées par la variation d'inclinaison moyenne. Les résultats sont présentés, pour chaque période, sous forme de diagrammes représentant, pour tous les axes de l'échantillon 'validation', la variation d'inclinaison simulée en fonction de la variation d'inclinaison observée. La qualité des simulations sera évaluée au niveau global en comparant à 1 la valeur de la pente du nuage de points (a), et au niveau individuel en appréciant le carré du coefficient de corrélation (R^2). L'évaluation au niveau local sera abordée après ajustement de paramètres. On présentera en outre les formes simulées d'un axe typique de chaque variété (L38, M19 et P31).

1.2.1. Simulation sans maturation

Les premières simulations ont été réalisées sans délais de lignification, ni de loi de réorientation. Pour ces simulations, nous avons utilisé la valeur d'élasticité déterminée au 1.1.4 en ajustant sur la date 1.

Les diagrammes concernant l'ensemble de l'échantillon sont présentés sur la figure 8. Les critères d'adéquation à chaque période sont rassemblés dans le tableau 3.

➤ Résultats aux différentes périodes

Concernant la période comprise entre les dates 0 et 1, les simulations sont pratiquement analogues à celles réalisées en négligeant la croissance secondaire. Ceci confirme que la croissance radiale est effectivement très faible sur cette période, et que son effet peut être négligé. L'adéquation est donc de bonne qualité au niveau global ($a = 1.02$) et au niveau individuel ($R^2 = 0.97$). Elle est, selon les axes, plus ou moins satisfaisante à l'échelle locale. Nous avons commenté au 1.1.4 trois des causes possibles d'inadéquation locale sur cette période. La prise en compte de la croissance radiale permet d'écarter la troisième. Seules la spécification du chargement et l'uniformité longitudinale du module peuvent donc être mises en cause.

Entre les dates 1 et 2, on note une tendance globale à sous-estimer les variations d'inclinaisons ($a = 0.69$). Les écarts individuels sont relativement importants ($R^2 = 0.48$). Concernant les axes L38, M19 et P31, illustrés sur les figures 9, 10 et 11, on note que :

- pour l'axe L38, la variation d'inclinaison sous le poids des fruits est légèrement sous-estimée (-28° au lieu de -32° entre les dates 1 et 2).
- pour l'axe M19, la variation d'inclinaison simulée est aussi légèrement sous-estimée (-20° au lieu de -24° entre les dates 1 et 2). De plus, on voit, comme à la date 1, une mauvaise adéquation au niveau local (la prise de courbure n'est pas assez intense au niveau de la partie basale).
- pour l'axe P31, on constate que la variation d'inclinaison est sous-estimée de près de 50% (-10° au lieu de -18° entre les dates 1 et 2).

Les résultats sur la période comprise entre les dates 2 et 3 nous permettent d'apprécier dans quelle mesure le modèle rend compte de l'intensité du redressement à la récolte. Au niveau global, on constate que le redressement est en moyenne très légèrement sous-estimé ($a = 0.95$). Ce résultat, satisfaisant au niveau global, cache des écarts individuels ($R^2 = 0.80$). L'intensité du redressement est surestimée pour certains axes et sous-estimée pour d'autres :

- pour l'axe L38, la variation d'inclinaison entre les dates 2 et 3 est simulée de façon tout à fait satisfaisante ($+41^\circ$ au lieu de $+43^\circ$).
- pour l'axe M19, le redressement simulé est presque deux fois plus intense que le redressement observé ($+23^\circ$ au lieu de $+14^\circ$). Il en résulte que l'inclinaison de l'axe à la date 3 est surestimée par le modèle.
- pour l'axe P31, le redressement simulé est du bon ordre de grandeur, bien que légèrement supérieur au redressement observé ($+31^\circ$ au lieu de $+28^\circ$). Cette erreur se cumule à celle de la période précédente, et l'inclinaison moyenne simulée à la date 3 est nettement supérieure à l'inclinaison observée.

La période comprise entre les dates 3 et 4, qui correspond au redressement de fin de saison, est très mal simulée pour l'ensemble des axes. Dans tous les cas, la variation d'inclinaison simulée sur cette période est faible en valeur absolue (-2° à $+5^\circ$). Les variations d'inclinaison observées sur la même période sont, pour la plupart des axes, nettement positives et de l'ordre de $+10^\circ$ à $+20^\circ$. Les exemples fournis illustrent ce fait. Il en résulte un biais global important ($a = 0.20$) et une très mauvaise corrélation ($R^2 = 0.10$).

Figure 9 : Evolution de la forme de l'axe "L38" avec : $E=3629$ MPa sans maturation

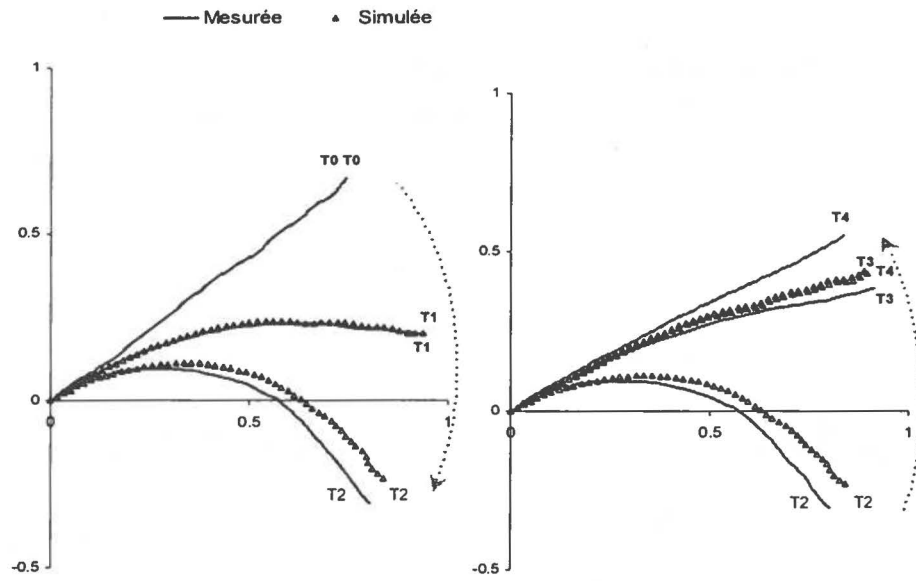


Figure 10 : Evolution de la forme de l'axe "M19" avec : $E=3432$ MPa sans maturation

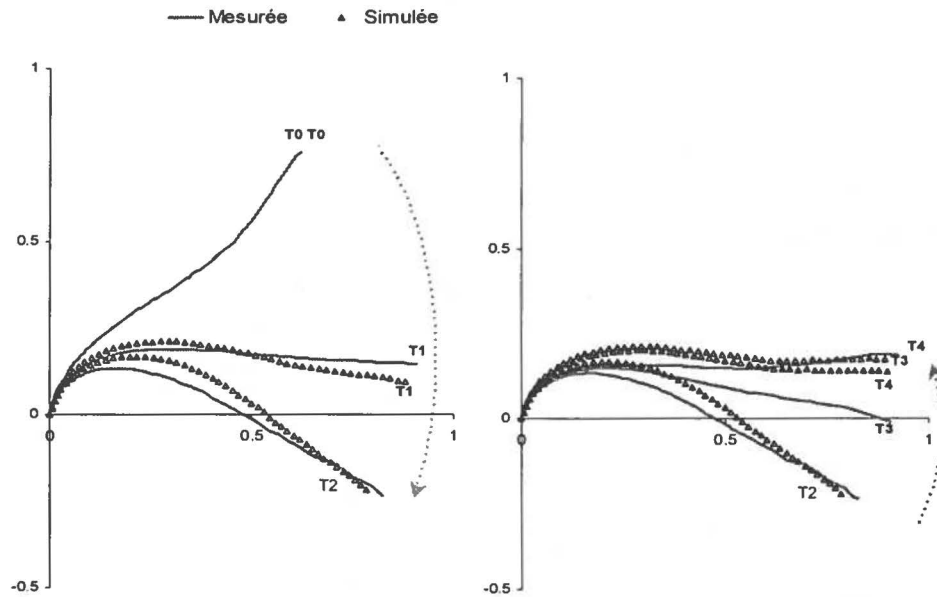
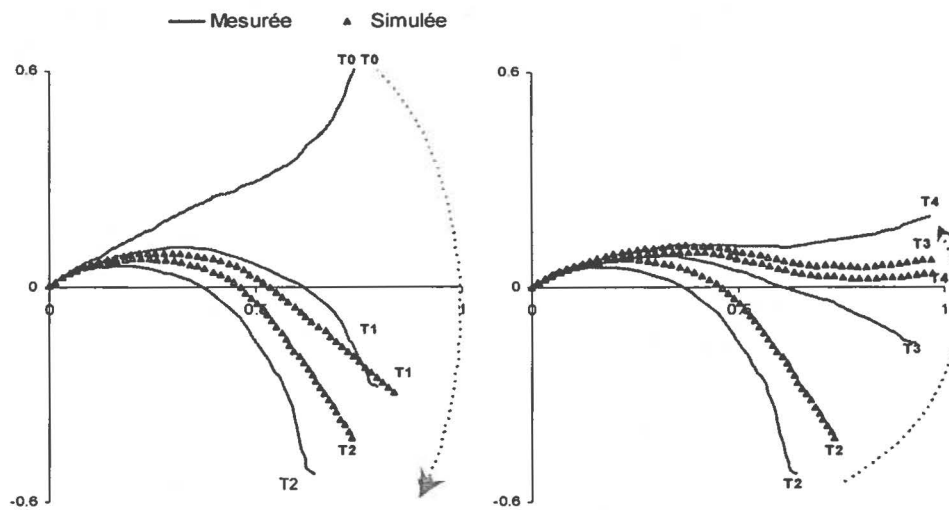


Figure 11 : Evolution de la forme de l'axe "P31" avec : $E=3687$ MPa sans maturation



➤ Causes des inadéquations

Les simulations sans paramètres de maturation sont globalement satisfaisantes pour les périodes 0-1 et 2-3. Durant ces deux périodes, la croissance radiale est effectivement négligeable et le phénomène de maturation n'intervient pas. Il est satisfaisant de constater que le modèle ajusté sur la période 0-1 reste globalement valable sur la période 2-3. Les causes d'inadéquation individuelles seront discutées après la prise en compte de la maturation.

La flexion est globalement sous-estimée entre les dates 1 et 2. Cette période est la plus complexe d'un point de vue mécanique, car la croissance en diamètre et l'accroissement de charge s'y réalisent simultanément de façon importante. Les erreurs commises durant cette période peuvent donc être attribuées à des causes mécaniques classiques (analogues à celles évoquées hors croissance diamétrale) autant qu'à l'action du délais de lignification ou de la maturation. Nous tenterons de discriminer ces causes d'inadéquation après prise en compte de la maturation.

Durant la période comprise entre les dates 3 et 4, l'accroissement pondéral des axes est faible, et le phénomène prépondérant est le redressement actif. Il est donc naturel qu'en négligeant la maturation on simule de faibles variations d'inclinaisons, et non le redressement observé.

1.2.2. Etude de l'effet des paramètres de maturation

➤ Effet du délai de lignification

La notion de délai de lignification a été introduite au paragraphe II-3.3.2. Ce délai est de l'ordre de quelques semaines. Compte tenu des dynamiques relatives de croissance diamétrale et de flexion des axes, son effet peut ne pas être négligeable. De fait, nous avons vu au IV-1.5.2 (figures IV-83 à IV-88), que la première vague de croissance en diamètre a lieu au moment où les axes subissent des variations d'inclinaison importantes et rapides liées au développement puis à la récolte des fruits. Un décalage de quelques semaines entre la mise en place des tissus et leur lignification peut avoir un impact important à cette période. En effet, indépendamment de toute déformation de maturation, la lignification d'une couche de bois donnée n'a pas le même effet selon le moment où elle se produit :

- si elle se lignifie au début de la phase de flexion intense sous le poids des fruits, elle s'oppose à cette flexion en augmentant la rigidité de l'axe.
- si elle se lignifie à la fin de la phase de flexion sous fruits, elle s'oppose au redressement à récolte en 'figeant' l'axe dans sa position fléchie.
- si elle se lignifie après la récolte, elle rigidifie l'axe en position redressée, et s'oppose aux réorientations ultérieures.

Les figures 12 et 13 représentent, pour un axe de la variété 'Palsteyn', les résultats de deux simulations faites avec des paramètres de lignification arbitraires. La forme simulée et la forme observée de cet axe est représentée aux différentes dates clés. La première simulation (figure 12) est réalisée en négligeant ce délai de lignification ; pour la seconde (figure 13) le délai de lignification a été fixé à trois semaines. On voit que ce paramètre joue pour cet axe un rôle important : sa prise en compte améliore nettement l'adéquation du modèle aux observations, notamment en ce qui concerne les dates 2 et 3. Ceci est liée au fait que sa croissance radiale démarre quelques semaines avant la récolte.

Des simulations analogues ont été réalisées sur différents axes et avec différentes valeurs de délai de lignification. Il en ressort que cet effet n'est pas toujours aussi important que dans l'exemple proposé, mais que la prise en compte d'un délai compris entre 2 et 4 semaines améliore en général la qualité des simulations. Dans les simulations ultérieures qui tiennent compte de la maturation, nous prendrons systématiquement en compte un délai de 3 semaines.

➤ Effet du choix de la loi de réorientation

Au chapitre IV-4, nous avons établi que le pourcentage de bois de tension (et donc l'intensité de la réorientation) dans une portion d'axe dépendait fortement de la variété, mais aussi de la variation d'inclinaison. Dans *ModelMeca2.2*, les réorientations sont prises en compte par l'intermédiaire d'un différentiel de déformation longitudinal de maturation (Δ DLM) qui joue un rôle équivalent à celui du pourcentage de bois de tension. Le Δ DLM associée à chaque segment est déterminé par une loi choisie par l'utilisateur (cf. II-3.3.2) : la loi la plus simple est un Δ DLM uniforme (dans le temps et le long de l'axe) ; des dépendances linéaires à différentes covariables (inclinaison locale, distance à la base, au sommet...) peuvent être prises en compte. Les coefficients associés à ces dépendances impliquent l'introduction de paramètres non mesurés supplémentaires.

J'ai comparé, sur différents axes, la loi de réorientation la plus simple, c'est à dire la loi uniforme (1 paramètre), à une loi de dépendance linéaire à l'inclinaison locale (2 paramètres). L'objectif est de déterminer dans quelle mesure l'introduction d'un paramètre supplémentaire améliore la qualité du modèle. La dépendance linéaire est définie par une inclinaison de consigne Φ_0 et un paramètre de réactivité k . On considère alors que la réaction est proportionnelle à la différence à l'inclinaison de consigne :

$$\Delta\text{DLM} = k \times (\Phi - \Phi_0) \quad \text{où } \Phi \text{ représente l'inclinaison.}$$

Les simulations ont été réalisées sur la période comprise entre les dates 3 et 4, au cours de laquelle les redressements actifs sont le phénomène prépondérant. Les paramètres de maturation ont été ajustés visuellement, de manière à avoir une bonne adéquation entre les formes simulées et observées. Les résultats pour les axes P10, L38 et P31 sont présentés sur les figures 14 à 16. La loi de Δ DLM uniforme permet de simuler le redressement d'une façon globalement satisfaisante. Cependant, l'adéquation est parfois imparfaite à l'échelle locale. En particulier, pour les axes P10 (figure 14) et P31 (figure 16), on note que le redressement est surestimé dans la partie basale et sous-estimé dans la partie distale. La prise en compte d'une dépendance locale à l'inclinaison améliore la qualité de la simulation, au point qu'il est possible, en ajustant visuellement les valeurs, de simuler une forme difficile à discerner de la forme mesurée (figures 14 à 16, partie droite).

Cependant, compte tenu des autres sources d'erreurs du modèle (qui seront illustrées dans la suite de cette section), cette amélioration m'a paru trop faible pour justifier l'introduction d'un nouveau paramètre ajustable. Par souci de parcimonie, nous négligerons la dépendance à l'inclinaison en considérant que la loi uniforme constitue, dans notre contexte de travail, une première approximation satisfaisante. Ce choix sera discuté ultérieurement.

1.2.3. Simulation avec maturation

➤ Simulation avec paramètres de maturation arbitraires

La seconde série de simulations a été réalisée en introduisant un délai de maturation de 3 semaines et un différentiel de maturation uniforme arbitrairement fixé à 2500 μ def. La figure 17 montre les diagrammes pour chaque période. Les pentes de régression et les corrélations sont indiquées sur le tableau 4. La prise en compte de la maturation engendre peu de différences sur la qualité des simulations entre les dates 0 à 3 : on observe une sous-estimation globale sur la période 1-2 et des inadéquations individuelles sur la période 2-3. Pour ces trois périodes, les pentes de régression et les coefficients de corrélation sont comparables à ceux obtenus sans tenir compte de la maturation (1.2.1).

Par contre, elle crée une nette amélioration des simulations sur la période comprise entre les dates 3 et 4. Avec ces paramètres, on simule bien des variations d'inclinaison positives et du bon ordre de

grandeur sur cette période. L'intensité du redressement reste cependant sous-estimée en moyenne ($a = 0.71$). Ce résultat, relativement satisfaisant d'un point de vue global, cache des écarts individuels importants, au point que la corrélation entre les séries simulées et observées est pratiquement nulle ($R^2 < 0.01$). Pour les trois cas particuliers illustrés sur les figures 18, 19 et 20, le redressement simulé est inférieur au redressement observé. Pour les axes L38 et P31 (figures 18 et 20), le jeu de paramètre utilisé permet de rendre compte de la variation d'inclinaison moyenne sur l'ensemble de la saison, même si l'adéquation reste imparfaite aux dates intermédiaires.

Des exemples de résultats de simulations établis à partir d'autres axes et divers jeux de paramètres peuvent être trouvés en annexe 9.

➤ Causes des inadéquations globales sur la périodes 1-2

Diverses raisons peuvent être évoquées pour expliquer le fait que le modèle a tendance à sous-estimer les variations d'inclinaison entre les dates 1 et 2 :

- le bras de levier des pousses a été négligé. Or, la plupart des pousses longues des axes se sont développées lors de la seconde unité de croissance, pendant cette période. Le fait de négliger ce bras de levier implique une sous-évaluation de la variation d'inclinaison particulièrement importante à cette période.
- d'autre part, cette période correspond à une phase intense de croissance diamétrale durant laquelle la constitution des sections évolue. Les propriétés mécaniques (élastiques et visco-élastiques) homogénéisées à l'échelle de l'axe sont donc susceptibles de varier durant cette période.

La nécessité de prendre en compte le premier point pour simuler correctement la flexion de certains axes a déjà été signalée dans le contexte hors croissance (1.1.3). Le second point implique que les propriétés mécaniques de structure (tenant compte des hétérogénéités au sein des sections et de l'axe, ainsi que de la visco-élasticité) varient au cours du temps, dans le sens d'une diminution du module apparent. Les deux simulations présentées sur les figures 21 et 22 le mettent en évidence : la première simulation a été réalisée avec la valeur du module ajustée sur la date 1, et la seconde en ajustant sur la date 2. La valeur ajustée sur la date 2 est inférieure à celle ajustée sur la date 1. D'autre part, aucune des deux valeurs ne permet d'ajuster simultanément aux deux dates.

Ce fait peut être justifié par des considérations anatomiques : la période considérée correspond à la première vague de croissance radiale, au cours de laquelle le bois mis en place est essentiellement constitué de vaisseaux, et donc moins dense et moins rigide que le bois déjà en place. D'autre part, l'épaisseur de l'écorce elle-même est susceptible de varier au cours de l'année ; si sa participation à l'inertie est plus importante à cette époque, cela peut expliquer la baisse du module de structure. Enfin, les charges pondérales étant maximales sur la période considérée, on peut envisager qu'on entre dans un domaine de sollicitation où le bois manifeste un comportement élastique non linéaire, qui implique une diminution du module apparent. Les variations des propriétés mécaniques au cours du temps ne peuvent pas être prises en compte par le modèle dans l'état actuel de son développement.

➤ Causes des inadéquations individuelles sur la périodes 2-3

Les écarts individuels sur la prévision du redressement à récolte sont assez importants. Ils peuvent être expliqués par des différences individuelles de variations des propriétés mécaniques de structure. En effet, dans un modèle de section composite, le redressement à récolte dépend de la valeur relative des modules d'élasticité dans les couches mises en place avant et après la flexion. Si les nouvelles couches sont faites d'un matériau moins rigide que les anciennes, le redressement effectif sera supérieur à celui prévu par le modèle de section homogène.

Figure 21 : évolution de la forme de l'axe 'L38' avant récolte, après ajustement du module sur la date 1.

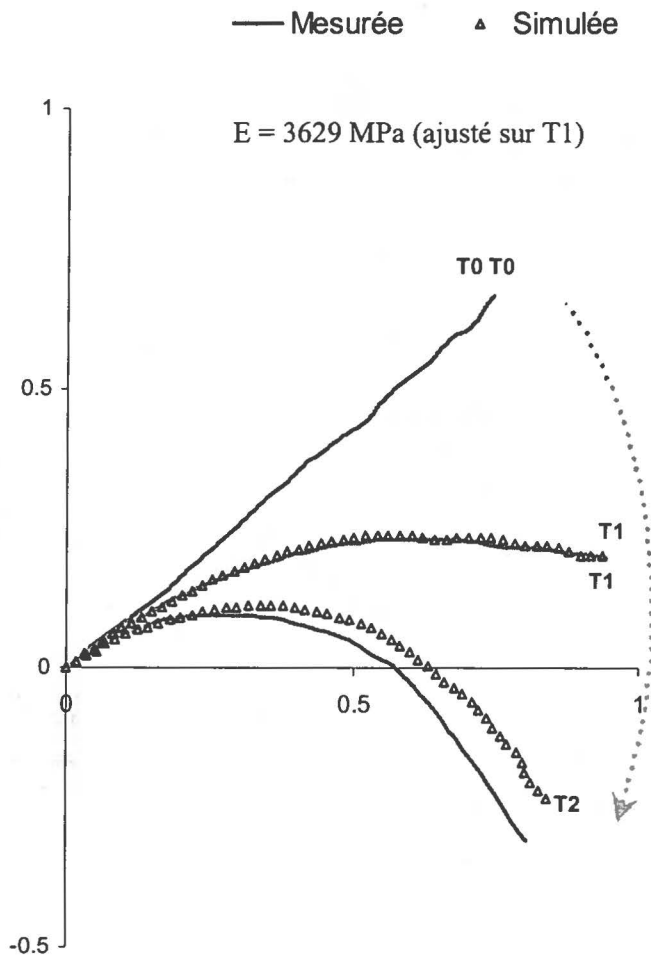
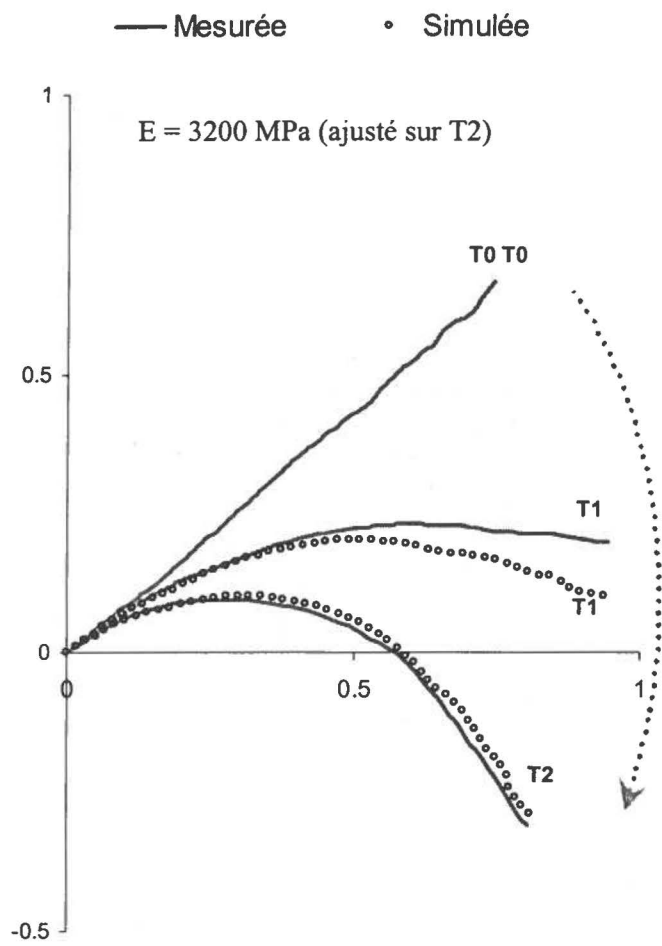


Figure 22 : évolution de la forme de l'axe 'L38' avant récolte, après ajustement du module sur la date 2.



➤ **Causes de l'inadéquation globale sur la périodes 3-4 et prise en compte d'une inclinaison de consigne**

Le redressement actif est pris en compte de manière grossière par le modèle : il ne fait intervenir aucune donnée mesurée et ne fait appel qu'à un paramètre ajustable. Nous avons noté qu'avec la valeur de différentiel de maturation utilisée, le redressement est globalement sous-estimé. L'adéquation globale sur la période en question peut être améliorée en choisissant une valeur supérieure pour ce paramètre.

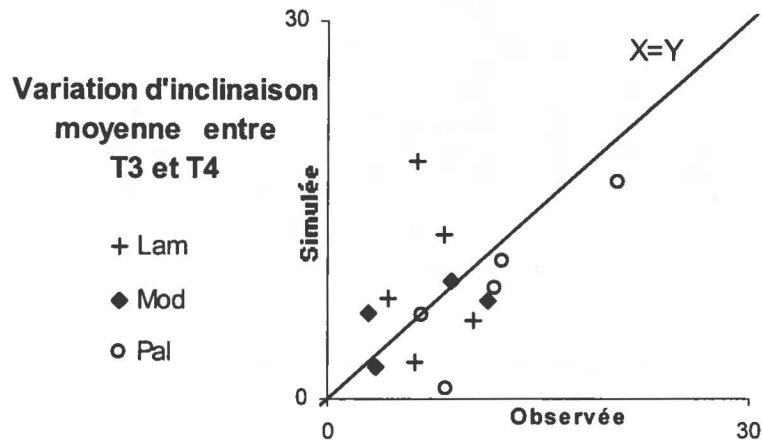
Le résultat des simulations réalisées avec une valeur de $4000 \mu_{\text{def}}$ sont illustrés sur la figure 23. La pente du nuage de point sur la période 3-4 vaut $a = 1.06$, ce qui indique un biais global très faible. La simulation ne s'en trouve pas pour autant améliorée à l'échelle individuelle ($R^2=0.01$). En outre, on constate qu'avec cette valeur, la qualité des simulations est détériorée aux autres dates (cf. tableau 5).

L'adéquation du modèle au niveau individuel peut être améliorée en avec une loi de réorientation plus sophistiquée, tenant compte d'une inclinaison de consigne Φ_0 . Différents couples inclinaison de consigne / coefficient de réactivité ont été testés dans le but d'obtenir une adéquation satisfaisante sur toute la saison. La meilleure adéquation a été trouvée pour une consigne fixée à $\Phi_0 = 50^\circ$ et une réactivité $k = 8000 \mu_{\text{def}} / \text{rad}$. La figure 24 illustre le résultat des simulations sur la période 3-4. La pente vaut 0.88, ce qui indique encore un léger biais. Par contre, la corrélation entre les valeurs simulées et mesurées est améliorée, bien qu'elle reste encore faible ($R^2=0.20$).

Les résultats obtenus au 2.1.2, en limitant la simulation à la période 3-4 et en ajustant les paramètres biomécaniques présentent une adéquation individuelle et locale de bien meilleure qualité. Une telle adéquation n'a pas pu être obtenue sans ajuster les paramètres pour chaque individu particulier. Plusieurs raisons justifient le fait que nous ne soyons pas allé plus loin dans la recherche d'une meilleure adéquation avec ce modèle. Elles seront discutés à la partie VI.

Figure 24 : relation entre la variation d'inclinaison simulée et observée entre T3 et T4.

Simulation avec E ajusté sur T0-T1
Délais 3 semaines
Consigne : 50°
Réactivité 8000 $\mu\text{def} / \text{rad}$



V-2. Quantification et hiérarchisation des facteurs conditionnant les différences variétales

2.1. Quantification de la prédisposition des axes à la flexion

Les données concernant la forme et les dimensions des axes au début de la saison et la valeur de leurs propriétés mécaniques, prises conjointement, permettent de prévoir le comportement mécanique des axes sous l'effet d'un chargement donné en dehors de tout phénomène de croissance.

Pour juger de ce comportement, nous allons calculer, à l'échelle de l'axe ou de la variété des indicateurs de la susceptibilité des axes à la flexion. Ces indicateurs relient la morphologie des axes à leur capacité à supporter une charge sans fléchir. Ils sont basés sur des formulations mécaniques simplifiées et des données à l'échelle de l'axe, et sont plus simples à mettre en œuvre que le modèle présenté à la section précédente.

2.1.1. Indicateur de susceptibilité à la flexion

➤ Choix d'un indicateur : la flexion unitaire

Nous avons établi au II-1.3.3 une formule permettant de calculer sous HPP la flexion $t(L)$ (c'est-à-dire la variation d'inclinaison de son extrémité) d'un axe horizontal, droit, homogène et sans défilement, en fonction de la longueur L , du diamètre D , de l'élasticité E et de la charge imposée M :

$$t(L) = K r M L^2 D^{-4} E^{-1}$$

avec $K = 32g/\pi$

$r = 1/3$ pour une charge uniformément distribuée le long de l'axe

La susceptibilité d'un axe à la flexion traduit la relation entre la charge imposée et la flexion qui s'en suit. Nous l'exprimerons comme la flexion par unité de charge (flexion unitaire), exprimée en $^{\circ}/g$:

$$t(L)/M = -32g/3\pi L^2 D^{-4} E^{-1}$$

Par commodité, les flexions unitaires, négatives, seront exprimées en valeur absolue. Cet indicateur ne tient pas compte de la forme et l'orientation initiale de l'axe, de son défilement, ni de la distribution réelle des charges. Son résultat ne doit pas être interprété comme une prédiction quantitative de la flexion, mais comme un indicateur partiel permettant de comparer la stabilité mécanique d'axes de morphologies différentes.

➤ Distribution des valeurs de flexion unitaire pour l'échantillon principal

La flexion unitaire a été calculée pour tous les axes de l'échantillon principal à partir des descripteurs morphologiques des axes à la première date (LONG, DMOYO). La valeur du module a été fixée à partir des estimations par variété en tenant compte de la visco-élasticité par une correction (cf. IV-2.3).

Les flexions unitaires calculées ont une distribution d'allure log-normales. La figure 25 montre, sur une échelle logarithmique, l'histogramme de leur distribution pour les trois variétés. Les valeurs sont toutes comprises entre 0.05 et 3 $^{\circ}/g$, mais les distributions sont très différentes entre variétés : 'Lambertin' a les valeurs les plus faibles, c'est à dire que c'est celui qui a le moins tendance à fléchir pour une charge donnée, 'Palsteyn' a les valeurs les plus élevées, et 'Modesto' a des valeurs intermédiaires. L'intervalle de confiance de la moyenne vaut 0.15 – 0.23 $^{\circ}/g$ pour 'Lambertin', 0.25 – 0.33 $^{\circ}/g$ pour 'Modesto', et 0.29 – 0.48 $^{\circ}/g$ pour 'Palsteyn'. Les différences entre variétés sont statistiquement significatives et quantitativement importantes.

➤ **Corrélation avec les variables morphologiques**

La flexion unitaire est une fonction explicite des descripteurs de la morphologie des axes. Ces descripteurs étant eux-mêmes corrélés entre eux, nous avons cherché dans quelle mesure il était possible d'établir une corrélation directe entre la flexion unitaire et les variables de morphologie. Sur l'ensemble des variétés, la flexion unitaire n'est pas corrélée à la longueur des axes. Elle est négativement corrélée au diamètre moyen et positivement corrélée au rapport d'élanement des axes. Le logarithme de la flexion unitaire présente une forte corrélation linéaire avec le rapport d'élanement ($R = 0.85$). La relation est illustrée sur la figure 26. On voit que cette relation est relativement indépendante des variétés. Le rapport d'élanement peut donc être considéré comme un bon prédicteur morphologique de la susceptibilité à la flexion d'un axe.

2.1.2. Application à la prévision de la flexion avant croissance diamétrale

Les flexions unitaires établies ont permis de synthétiser l'information sur la structure des axes en terme de soutien, afin de comparer les variétés. Les données sur le chargement réel des axes nous permettent d'aller plus loin dans l'exploitation de ce modèle analytique simple. La flexion effective des axes peut être prédite en tenant compte du chargement réel, et comparée à la flexion observée.

La modélisation concerne la période située avant le début de la croissance diamétrale, pendant laquelle l'application de la théorie est valide. Elle est basée sur la même formule que celle utilisée au 2.1.1, en tenant compte de l'information sur le chargement réel. Le chargement est quantifié par masse totale de charge à la date 1 (MTOT1) à laquelle nous avons établi que la croissance radiale n'avait pratiquement pas démarré (cf. IV-1.4). Nous supposons toujours que la distribution des charges est uniforme le long de l'axe. Sous ces conditions, le modèle analytique prévoit une variation d'inclinaison de l'extrémité donnée par :

$$i(L) = -32g/3\pi ML^2D^4 E^{-1}$$

Ces flexions théoriques ont été évaluées pour tous les axes de l'échantillon principal. L'intervalle de confiance de leur moyenne vaut $-29.0 \pm 6.3^\circ$ pour 'Lambertin', $-34.3 \pm 6.3^\circ$ pour 'Modesto' et $-53.6 \pm 4.0^\circ$ pour 'Palsteyn'. Le tableau 6 présente conjointement les moyennes théoriques et mesurées, pour l'ensemble des axes et par variété. L'« erreur » indiquée correspond à la différence relative entre les moyennes théoriques et mesurées.

Flexion à la date 1	Théorique	Mesurée	Erreur
Toutes variétés	-38.5	-41.0	+6 %
'Lambertin'	-29.0	-25.7	-13 %
'Modesto'	-34.3	-45.9	+25 %
'Palsteyn'	-53.6	-52.6	-2 %

Tableau 6

Ce modèle analytique très simple sans aucun paramètre ajustable, simule la flexion moyenne de façon très satisfaisante (l'erreur sur l'ensemble des axes n'est que de 6%). Le classement des moyennes par variété est identique sur les valeurs théoriques et sur les valeurs mesurées. 'Lambertin' fléchit plus que 'Modesto', et 'Palsteyn' fléchit significativement plus que les deux autres variétés. Cependant, on note que pour la variété 'Modesto' la théorie a tendance à sous-estimer la flexion de 25% en moyenne. La figure 27 présente les flexions théoriques, calculées pour chaque axe à partir des données mesurées, en fonction des flexions mesurées sur la même période (on rappelle que, sous l'hypothèse d'encastrement parfait, la variation d'inclinaison de l'extrémité est rigoureusement égale à la variation de courbure totale de l'axe). Le graphique indique la droite $X=Y$, correspondant à une parfaite concordance entre l'observation et la théorie. On note que des écarts importants sont observés pour certains axes. Ces

écarts peuvent être attribués aux nombreuses hypothèses simplificatrices du modèle, qui agissent dans des sens différents et se compensent mutuellement pour partie :

- 1- le fait de négliger l'inclinaison initiale implique une surestimation systématique du bras de levier, et donc de la flexion.
- 2- l'HPP implique en général une sous-estimation de la flexion quand celle-ci est importante.
- 3- le fait de négliger la conicité implique une surestimation de la flexion.
- 4- l'assimilation de la répartition des charges à une distribution homogène (alors que le chargement linéique a plutôt tendance à augmenter de la base vers l'apex) implique une sous-estimation de la flexion.

La plus ou moins grande conformité à ces hypothèses est susceptible d'expliquer une grande partie des écarts individuels. Pour les axes des variétés 'Modesto' et 'Lambertin', on note une tendance globale à surestimer la flexion quand celle-ci est faible, et à la sous-estimer quand elle est de grande envergure. Cet effet peut être interprété comme la conséquence des hypothèses 1- et 2-. Sur ces axes initialement très dressés, l'effet de l'hypothèse 1- est dominant si la flexion est faible, et l'effet de l'hypothèse 2- devient prépondérant quand la flexion est importante.

2.1.3. Calcul de profil de réponse et de valeurs critiques

➤ Principe : calcul du profil de réponse à un paramètre

Pour caractériser l'aptitude des axes d'une variété à supporter la charge, un autre indicateur a été calculé par voie numérique à l'aide de *ModelMecal* (cf. II-2.1). Le calcul de cet indicateur met en œuvre le calcul de « profil de réponse » à un paramètre. Celui-ci consiste à tracer la flexion de l'axe soumis à une charge en fonction d'un des paramètres du modèle. L'influence de divers paramètres globaux (longueur, diamètre, conicité, module d'élasticité, charge totale...) peut ainsi être étudiée.

➤ Mise en œuvre des calculs

Une procédure a été intégrée à *ModelMecal* pour mettre en œuvre ces calculs. Cette procédure réalise de façon itérative le calcul de déformée en grands déplacements, en faisant varier la valeur d'un paramètre, et trace l'évolution de la flexion en fonction du paramètre.

Le profil de réponse à une charge imposée à l'extrémité a été calculé pour les « axes moyens » de chaque variété, à partir des données de début de saison. Les paramètres utilisés sont indiqués sur le tableau 7.

Variété	L (m) =LONG	I (°) =INCM0	D (mm) =DOMY0	K (mm/m) =CONI0	E (MPa)
<i>Lambertin</i>	1.17	55.3	7.46	-5.59	4445
<i>Modesto</i>	1.16	61.7	6.53	-5.70	4887
<i>Palsteyn</i>	1.27	36.9	6.75	-5.45	4194

Tableau 7

La figure 29 montre l'évolution de la flexion en fonction de la charge. On voit que, pour les trois variétés, la flexion croît en fonction de la charge, d'une façon non linéaire. Ce fait est dû à la prise en compte des grands déplacements. A charge égale, 'Palsteyn' accuse toujours la flexion la plus forte et 'Lambertin' la plus faible. Pour des faibles charges, 'Modesto' fléchit sensiblement autant que 'Lambertin', alors que pour des charges importantes, son comportement de rapproche de celui de 'Palsteyn'. Ceci est lié au fait, évoqué au 2.1.2, que l'effet de l'inclinaison initiale domine quand le chargement est faible, alors que l'effet des grands déplacements domine pour des charges fortes.

➤ Détermination de paramètres critiques

Si on est dans la situation du flambement élastique, c'est à dire que l'axe est initialement droit et vertical, le profil de réponse a une allure particulière. En effet, la géométrie droite et verticale correspond à une position d'équilibre qui est stable dans certaines conditions et instable dans d'autres. Pour tout paramètre, il existe une valeur critique en dessous de laquelle la flexion est nulle, et au delà de laquelle elle la flexion croît rapidement. Nous avons évoqué au II-2.1.3 la charge critique, pour laquelle on connaît une expression analytique sous certaines hypothèses. De la même manière, le modèle utilisé ici permet de déterminer par voie numérique une valeur critique de longueur, de diamètre, d'élasticité ou de conicité. Un paramètre de ce type est couramment utilisé en écologie, afin de disposer d'un indicateur synthétique de la stabilité mécanique d'axes ligneux, permettant de comparer des axes à différents stades de développement ou différentes espèces (Gartner 1991; Niklas 1994; Briand et al. 1998). Le paramètre utilisé est la hauteur critique de flambement (*critical buckling height*). Dans ce contexte il est calculé à partir de formules analytiques.

Afin de caractériser la susceptibilité à la flexion par une valeur unique de masse dans le but de comparer les variétés, nous avons déterminé la masse critique pour chaque variété en supposant que l'axe est initialement droit et vertical. Ce descripteur intègre l'effet de la longueur, du diamètre, de la conicité et de l'élasticité. La figure 29 rapporte les profils obtenus. Nous avons déterminé graphiquement la masse critique comme la valeur à partir de laquelle la flexion dépasse 1°. Elle vaut 135g pour 'Lambertin', 95 g pour 'Modesto' et 80 g pour 'Palsteyn'. Ces valeurs ne doivent pas être interprétées directement en terme de charge maximale que peut supporter l'axe, mais constituent des indicateurs permettant de comparer de la stabilité d'un axe théorique ayant les propriétés mécaniques et la morphologie moyenne des axes d'une variété donnée²².

Cet indicateur concorde avec la flexion unitaire quant à la conclusion qualitative au niveau des variétés : 'Palsteyn' est le plus sensible à la flexion, 'Lambertin' le moins sensible et 'Modesto' se situe de façon intermédiaire. Ces conclusions sont cohérentes avec l'observation de la saison de croissance et du port des variétés.

2.2. Quantification de l'effet de la synchronisation entre chargement et croissance radiale

2.2.1. Indicateur de la flexion « figée » par la croissance

Les formules établies à la section II-3.1 nous permettent d'étudier l'effet de l'interaction entre un chargement temporaire et la croissance en diamètre, dans le cas où les deux phénomènes sont découplés dans le temps. L'étude de la dynamique de croissance / flexion a montré que, entre le débourrement et la récolte, les axes se rapprochent de cette situation. En effet, le chargement et la flexion des axes se font en grande partie avant la première phase de croissance en diamètre. Nous supposons que la croissance jusqu'à maturité se fait en deux étapes :

- 1- chargement et flexion de l'axe sous l'effet de la croissance pondérale axillaire.
- 2- croissance radiale et rigidification de l'axe en position fléchie.

La théorie nous permet alors de calculer la part de la flexion qui est « figée » par la croissance diamétrale, c'est à dire la part qui ne se redresserait pas si on supprimait toutes les charges qui ont

²² précisons aussi que, compte-tenu de la méthode de détermination, ce n'est qu'une approximation de la charge critique au sens de Timoshenko

généralisé la flexion²³. Pour un élément de poutre homogène d'inertie en flexion I_0 successivement soumis à une flexion caractérisée par une variation de courbure ΔC puis à un accroissement d'inertie ΔI , la variation de courbure $\Delta C'$ figée par la croissance en diamètre vaut (équation 37) :

$$\Delta C' = \Delta C \Delta I / (I_0 + \Delta I)$$

L'application de cette formule à un axe de longueur donnée requiert théoriquement l'intégration de cette expression le long de l'axe. Nous utiliserons une formulation simplifiée en supposant que l'inertie initiale, les variations d'inertie et les variations de courbure sont uniformes le long des axes. On peut alors directement transposer cette formule au cas d'un axe d'inertie moyenne $IMOY0$ soumis à une flexion caractérisée par la variation de courbure totale $CTOT02$ puis à un accroissement de l'inertie moyenne $MOYI02$. La variation de courbure totale figée par la croissance en diamètre vaut alors :

$$CTOT' = CTOT02 MOYI02 / (MOYI0 + MOYI02) \quad (\text{équation 67})$$

Cet indicateur a été calculé à partir des données mesurées sur tous les axes suivis sur la période comprise entre le débourrement et la récolte des fruits. Il combine l'effet de la flexion sur cette période et l'action de la croissance radiale. La figure 30 montre l'histogramme de sa distribution. L'intervalle de confiance de la moyenne vaut $-14.1 \pm 5.3^\circ$ pour 'Lambertin', $-30.2 \pm 7.5^\circ$ pour 'Modesto' et $-24.7 \pm 5.1^\circ$ pour 'Palsteyn'. La différence entre 'Lambertin' et les deux autres variétés est hautement significative. L'histogramme fait clairement ressortir la singularité de la variété 'Lambertin', pour laquelle les trois quart des axes ont une flexion théoriquement « figée » inférieure à 15° en valeur absolue. Ce comportement est dû à la synergie de deux phénomènes :

- la flexion sous la charge est moins importante que pour les autres variétés (essentiellement à cause de la plus grande stabilité mécanique de ses axes, liée à leur faible rapport d'élançement).
- la croissance en diamètre est relativement faible pendant la période de forte charge, et ne fige qu'une faible part de cette flexion.

2.2.2. Application à la prévision du redressement à récolte

La formule établie au paragraphe précédent peut être adaptée à la prévision du redressement des axes au moment de la récolte. Dans notre cas, il nous faut tenir compte du fait que seule la fraction du chargement total constituée par les fruits est supprimée au moment de la récolte. Le redressement théorique à récolte sera donc évalué par :

$$REDR = -M\%FR2(CTOT02 - CTOT')$$

où $M\%FR2$ représente la part des fruits dans le chargement total à maturité. En remplaçant $CTOT'$ par son expression (équation 67), le redressement théorique à récolte s'exprime finalement :

$$REDR = M\%FR2 \times CTOT02 \times MOYI0 / MOYI2$$

Cet indicateur a été calculé sur l'ensemble des axes avec fruits. Les moyennes théoriques et mesurées sont indiquées dans le tableau 8. On a de plus indiqué la différence relative entre les moyennes théoriques et mesurées (« Erreur »).

Redressement à la			
-------------------	--	--	--

Tableau 8

²³ ce qui correspond à la variation de courbure de référence.

chute des fruits	Théorique	Mesuré	Erreur
Toutes variétés	23.0	23.5	-2 %
'Lambertin'	23.8	34.0	-30 %
'Modesto'	21.1	14.3	+48 %
'Palsteyn'	30.1	19.9	+51 %

Sur l'ensemble des axes, la différence entre la valeur prévue par ce modèle analytique très simple et la valeur mesurée est très faible (-2%). Cependant, les moyennes par variété calculées par la théorie ne concordent pas très bien avec les moyennes mesurées : le redressement est en moyenne sous-estimé pour 'Lambertin', et surestimé pour 'Modesto' et 'Palsteyn'.

La figure 31 représente les valeurs théoriques en fonction des valeurs mesurées de redressement à récolte. On a représenté la droite $X=Y$ correspondant à une parfaite concordance entre la théorie et la réalité. Les résultats sont inégaux entre les variétés. On note en particulier :

- pour la variété 'Modesto', le redressement théorique est surestimé pour des faibles valeurs de redressement réel, et sous-estimé pour des fortes valeurs.
- pour 'Palsteyn', le redressement théorique est toujours surestimé.
- pour 'Lambertin', le redressement est pratiquement toujours sous-estimé.

Nous avons signalé au 1.2.3 que les variations de propriétés mécaniques de couches de bois mises en place étaient susceptibles d'expliquer une partie de ces erreurs. Cette explication est cohérente avec les différences variétales de croissance en diamètre sur cette période : si on suppose que les nouvelles couches sont plus rigides que les anciennes, alors le redressement est d'autant plus surestimé par le modèle que la croissance en diamètre est importante sur cette période. Ce facteur est susceptible d'expliquer le fait que les redressement de 'Modesto' et 'Palsteyn' sont en moyenne surestimés.

Ajoutons que les hétérogénéités longitudinales d'inertie et d'incrément d'inertie, que nous avons négligées pour ce calcul à l'échelle de l'axe, peuvent accentuer ce phénomène. Si l'incrément relatif d'inertie est maximal au niveau de la zone la plus courbée, le redressement effectif sera inférieur à celui prévu par le modèle ; réciproquement, si l'incrément relatif d'inertie est maximal au niveau de zones faiblement courbées, le redressement sera supérieur à celui prévu par le modèle.

2.3. Quantification de l'effet de la maturation

2.3.1. Indicateur de l'effort de redressement

Nous avons exprimé au II-3.2.2 (équation 65) la variation de courbure d'une portion d'axe de rayon R sous l'effet de la maturation d'une couche d'épaisseur ΔR contenant un secteur de bois de tension d'extension tangentielle Φ soumis à un différentiel de DLM α (sous hypothèse d'homogénéité des propriétés élastiques au sein de la section).

L'application rigoureuse de ces formules à un axe de caractéristiques connues requiert l'intégration de cette expression le long de l'axe. Nous utilisons une formulation simplifiée en supposant que les valeurs (dimensions de l'axe, constantes élastiques, quantité de bois de tension et DLM) sont constantes le long des axes et égales à leur valeur moyenne. La variation de courbure totale $\Delta CTOT^{BT}$ d'un axe sous l'effet de la maturation peut alors s'exprimer en fonction de sa longueur $LONG$, de son diamètre moyen initial $DMOY$, de sa variation de diamètre moyen $\Delta DMOY$, du pourcentage moyen de bois de tension $BT\%$, et du différentiel de DLM α . En supposant que le bois de tension est distribué en bandes radiales situées dans le haut des sections (ce qui est en général le cas, cf. IV-4.3.2), on peut

exprimer l'extension tangentielle Φ d'une zone de bois de tension équivalente à un pourcentage de bois de tension BT% donné : $\Phi = 2\pi \times BT\%$. On a alors :

$$\Delta CTOT^{BT} = LONG \times 16\alpha \times \sin(\pi \times BT\%) \times \Delta DMOY / (\pi \times (DMOY + \Delta DMOY)^2)$$

2.3.2. Application à la prévision du redressement de fin de saison

Nous avons établi à la section IV-1.3 que les axes sont soumis à un accroissement pondéral très faible après la récolte, et que leur variation de forme sur cette période peut être essentiellement attribuée au rôle de la maturation. La formule précédente peut donc être appliquée à partir des valeurs mesurées sur les axes des trois variétés, pour modéliser le redressement en fin de saison CTOT34 en fonction de DMOY3, DMOY34, LONG, BT%99 et de la valeur du différentiel de DLM. Le calcul a été fait pour les axes sur lesquels l'analyse anatomique a été pratiquée (15 par variété, cf. IV-4.3.3) en utilisant les valeurs moyennes de pourcentage de bois de tension par axe, et en supposant que $\alpha = 2500 \mu\text{def}$. La distribution de cet indicateur est illustrée figure 32. Les moyennes théoriques et mesurées sont indiquées dans le tableau 9 pour chaque variété.

Redressement en fin de saison	Théorique	Mesuré	Biais
Toutes variétés	13.5°	12.2°	+11 %
'Lambertin'	12.4°	11.9°	+4 %
'Modesto'	10.7°	9.2°	+16 %
'Palsteyn'	17.5°	15.5°	+13 %

Tableau 9

Avec la valeur de α utilisée, la concordance entre la théorie et l'observation est bonne au niveau des moyennes par variété. Le redressement n'est surestimé que de 11% en moyenne, avec peu de différences entre les erreurs moyennes par variété. Ceci implique d'une part que la valeur réelle des ΔDLM moyennes est de cet ordre de grandeur, d'autre part que les différences de ΔDLM entre variétés, si elles existent, sont relativement faibles. On note que 'Modesto', bien qu'étant la variété produisant le pourcentage de bois de tension le plus élevé, est aussi celle qui se redresse le moins en fin de saison. Ceci est lié au fait que sa croissance diamétrale est faible sur cette période (une part importante s'est réalisée pendant la période avant récolte, cf. IV-1.4).

La figure 33 représente les redressements théoriques et observés sur cette période pour tous les axes. On voit qu'au niveau individuel, la concordance n'est pas satisfaisante. Le coefficient de corrélation entre les séries mesurées et observées est significativement non nul, mais sa valeur est faible ($R^2=0.20$). Globalement, le redressement est surestimé pour les faibles valeurs et sous-estimé pour les valeurs fortes. Les écarts individuels peuvent être attribués à des causes diverses, liées à la grande simplicité du modèle utilisé :

- les variations longitudinales de diamètre et d'incrément de diamètre ont été négligées.
- l'hétérogénéité de la distribution du bois de tension a été négligée :
 - sa distribution longitudinale réelle peut impliquer une plus ou moins grande efficacité selon les segments où le bois de tension est concentré (à pourcentage de bois de tension égal, le redressement est plus important dans les segments de petit diamètre que dans ceux de gros diamètre).
 - sa distribution tangentielle implique aussi une plus ou moins grande efficacité du bois de tension selon qu'il est ou non concentré dans le haut du cerne. C'est par exemple le cas de l'axe M35, pour lequel le redressement prévu vaut +10°, alors que la variation de courbure

totale observée sur la même période est de -3° . La figure 34 montre la distribution du bois de tension au niveau du milieu de chaque tiers de cet axe. On voit clairement sur les parties médiane et terminale que le bois de tension n'est pas positionné dans le haut des cerne. Cette distribution s'explique par le fait que cet axe est resté très dressé toute la saison : les distributions de bois de tension observées correspondent alors à un tâtonnement autour de la verticale, et non à un redressement polarisé dans une direction particulière.

- sa distribution radiale implique des variations sur les périodes auxquelles se fait le redressement. Nous avons montré IV-4.3.2 des exemples pour lesquels le bois de tension est surtout localisé au début du cerne. Dans ce cas, le pourcentage moyen calculé sur tout le cerne n'est pas une bonne approximation du pourcentage de bois de tension produit pendant la période considérée, et on surestime le redressement actif sur cette période. Inversement, sur certains axes, le bois de tension est surtout présent au niveau de la fin du cerne et on sous-estime alors le redressement actif en fin de saison. C'est le cas de l'axe P31, dont la distribution du bois de tension est illustrée sur la figure 35, pour lequel le redressement prévu par le modèle est la moitié du redressement réel observé.
- à quantité de bois de tension égale, la valeur du différentiel de DLM est susceptible de varier entre axes, et au sein des axes.

D'autre part, l'excentricité peut constituer un mécanisme complémentaire de redressement dont nous n'avons pas du tout tenu compte dans ce modèle.

Enfin, le redressement observé sur cette période intègre, le cas échéant, la flexion due à une addition de charge. Cette flexion est en général très faible, car la croissance axillaire est quasiment nulle sur cette période et l'incrément de poids de l'axe lui-même est faible. Cependant, dans le cas des axes avec une troisième unité de croissance, cette perturbation n'est plus négligeable. C'est par exemple le cas de l'axe L36 (figure 33) qui comporte une troisième unité de croissance importante. La variation de courbure mesurées pour cet axe en fin de saison est donc une sous-estimation de l'effet du redressement actif sur cette période, ce qui explique la différence entre le redressement simulé et le redressement observé.

2.4. Validité des modèles analytiques simplifiés

Les différents indices calculés à partir de données globales, ont été comparés aux observations à l'échelle globale et individuelle. Ces indices ne font intervenir aucun paramètre ajustable, et sont basés sur des hypothèses mécaniques simplistes. Il est intéressant de constater qu'ils ont mené à des prévisions tout à fait réalistes. La qualité de concordance au niveau global est plutôt surprenante. Elle est en général due à des compensations des diverses erreurs induites par les hypothèses du modèle.

Ce type d'indice, basé sur très peu de mesures et des calculs faciles à mettre en œuvre, peut être utilisé pour comparer des génotypes. Notons cependant qu'il serait dangereux de les utiliser sans une analyse biomécanique critique. Le choix des périodes sur lesquelles se basent les descripteurs utilisés peut en particulier avoir un impact important sur les résultats. Il n'en reste pas moins que, dans le cas de l'abricotier, ils pourraient être utilisés « en routine » pour juger sommairement des facteurs conditionnant le port d'autres variétés. Nous reviendrons sur ce point à la partie VI.

2.5. Bilan : hiérarchisation des facteurs du port

Le tableau 10 rassemble, pour les trois variétés, le principaux indices biomécaniques quantifiés.

2.5. Bilan : hiérarchisation des facteurs du port

Le tableau 10 rassemble, pour les trois variétés, le principaux indices biomécaniques quantifiés.

Tableau 10	Lambertin	Modesto	Palsteyn
Elasticité corrigée (MPa)	4445	4887	4194
Rapport d'élanement (m/m)	158	177	192
Charge en fruits à la date 1 (g)	29.6	55.6	57.3
Charge en fruits à la récolte (g)	81.3	137.4	(non obs)
Charge totale en pousses (g)	155	168	189
Accroiss. rel. d'inertie avant récolte (%)	84 %	211 %	158 %
Pourcentage de bois de tension	12 %	28 %	25 %
Flexion unitaire (°/g)	0.18	0.28	0.37
Flexion théorique à la date 1 (°)	-29.0	-34.3	-53.6
Flexion sous fruits figée (°)	-14.1	-30.2	-24.7
Redressement actif après récolte (°)	12.4	10.7	17.5

Sur la base des résultats exposés à la partie IV et dans ce chapitre, il est possible de proposer une hiérarchisation des facteurs qui conditionnent les changements d'orientation des axes étudiés :

- **l'élanement** est le principal facteur responsable des différences variétales pour trois raisons :
 - c'est le paramètre le plus sensible dans le calcul de la flexion sous charge
 - la flexion sous charge est la période où les réorientations sont les plus intenses
 - les variétés diffèrent nettement dans leur élanement, les variétés qui fléchissent le plus ayant les axes les plus élanés
- **le chargement**, en pousses et en fruits, est un facteur prépondérant :
 - il est responsable de l'importance de la flexion en début de saison
 - les différences variétales sont nettes pour ce facteur : la charge en fruits est en grande partie responsable de la faible flexion de 'Lambertin' ; les variétés qui fléchissent le plus sont aussi celles qui ont le feuillage le plus abondant
- **la dynamique de croissance diamétrale** joue un rôle important :
 - le « non-redressement » à récolte est conditionné par l'incrément relatif d'inertie en présence des fruits, sensible à de faibles variations de diamètre
 - le démarrage tardif de la croissance en diamètre explique le bon redressement de la variété 'Lambertin'
- **le module d'élasticité** a un rôle mineur, car les différences entre variétés sont très faibles.
- **le redressement actif** n'est pas susceptible d'expliquer les différences entre les variétés : des différences entre variétés sont bien observées, mais dans le sens inverse à celui qu'on pourrait attendre (les variétés qui ont le plus de bois de réaction sont les moins dressées).

Ces résultats concernent la flexion des axes pendant leur seconde année de croissance. L'orientation des axes différerait nettement au début de la saison. Les différences d'**inclinaison initiale** se cumulent aux facteurs évoqués, notamment en ce qui concerne la variété 'Palsteyn'.

Partie VI- Discussion générale, conclusion et perspectives

Les bases théoriques, méthodes et mesures ont été introduites dans les parties II et III. Les résultats, issus de l'analyse statistique, de la mise en œuvre de modèles et du calcul de descripteurs synthétiques ont été présentés dans les parties IV et V. La dernière partie de ce mémoire reprend ces divers éléments de façon critique, en les mettant en regard de travaux analogues.

Le modèle mécanique sera tout d'abord comparé à des modèles préexistants. Puis nous reviendrons sur les mesures mécaniques réalisées, en mettant l'accent sur des aspects méthodologiques. Ensuite, la représentativité de l'échantillon choisi sera discuté et certains résultats du suivi de croissance/flexion laissée en suspens lors de la présentation seront interprétés. L'avant dernier chapitre revient sur les réorientations actives, en discutant les aspects méthodologiques et les résultats obtenus. Enfin, le travail effectué au cours de cette thèse sera mis en perspective, en cernant la portée des résultats et ses applications.

VI-1. Originalités et limites du modèle développé

Divers modèles mécaniques ont été proposés par le passé pour simuler l'évolution de la forme d'axes ligneux. Ces modèles diffèrent sur plusieurs aspects. En particulier par les hypothèses, mécaniques et biologiques, sur lesquelles ils reposent. Les différences résident aussi dans leur degré d'abstraction et de réalisation : la formulation du problème est plus ou moins explicite, le modèle peut ou non avoir donné lieu à la réalisation d'un programme qui le met en œuvre, intègre plus ou moins d'information exogène, peut permettre la prise en compte d'une information directement mesurée ou se baser entièrement sur des paramètres de simulation, peut avoir été validé de différentes manières. Les modèles qui se sont concrétisés par des programmes diffèrent aussi par les techniques de résolution qu'ils mettent en œuvre, leur degré de convivialité et leurs performances numériques.

L'objectif de cette partie est de situer notre modèle et son application par rapport à des démarches analogues préexistantes, en mettant l'accent sur les hypothèses de base. Nous nous attacherons successivement aux aspects purement mécaniques (modèle hors croissance) et aux aspects biomécaniques (modèle en croissance).

1.1. Aspects mécaniques (hors croissance)

La construction de modèles mécaniques appliqués à des axes ligneux a été envisagée pour des objectifs variés. Nous nous contenterons ici d'évoquer des travaux concernant le calcul de la répartition des contraintes et des déformations dans un axe ligneux sous l'effet d'un chargement statique (les chargements dynamiques au vent en sont exclus).

Le modèle développé sera comparé à cinq travaux analogues. Afin de raisonner les modes de conduite sur des arbres ornementaux, Leiser a développé un modèle permettant de prévoir les contraintes et déformations sous l'effet du vent en fonction des caractéristiques de structure des troncs (Leiser et Kemper 1973). Un modèle destiné à analyser la résistance d'arbres sous le poids de la neige a été développé dans le contexte forestier (Mamada et al. 1984). Ultérieurement, Morgan et Cannell ont développé un modèle plus général permettant de prendre en compte ces deux types de chargement dans le contexte forestier (Morgan et Cannell 1987). Ce modèle a ensuite été repris et appliqué à l'estimation de module d'élasticité de structure sur des épicéas sur pied (Milne et Blackburn 1989). Une formulation un peu différente du même problème a été donnée dans le cadre du calcul de profil de contrainte dans des troncs d'Eucalyptus soumis à l'effet du vent (West et al. 1989).

Pour la clarté de l'exposé, ces différents modèles seront désignés par le nom du premier auteur.

➤ Définition de la structure

Dans tous ces modèles, ainsi que dans le nôtre, la structure est supposée très élancée et le problème est résolu grâce à la théorie des poutres en flexion. Ce cadre est classique pour l'application aux axes ligneux. La description des caractéristiques de la structure n'est pas toujours identique. Les modèles les plus simples se basent sur une description paramétrique de l'évolution longitudinale du diamètre. Dans le modèle de Leiser, celle-ci est donnée par un paramètre de conicité, ce qui sous-tend l'hypothèse de défilement uniforme du tronc. Une prise en compte plus précise du défilement réel du tronc est obtenue en considérant que la structure est constituée de plusieurs éléments de poutre de diamètre distinct (Morgan et Cannell 1987; Milne et Blackburn 1989; West et al. 1989). C'est la solution que nous avons retenue. La géométrie initiale de la structure est supposée rectiligne et verticale dans les cinq modèles évoqués (Leiser et Kemper 1973; Mamada et al. 1984; Morgan et

Cannell 1987; Milne et Blackburn 1989; West et al. 1989). Une forme initialement rectiligne peut se justifier dans le cas d'un tronc, qui est le contexte d'étude des travaux cités. Dans le cas d'une branche, ou d'un tronc sinueux ou incliné, il faut pouvoir tenir compte de l'orientation et de la forme initiales. C'est là une originalité de notre modèle : la forme initiale de l'axe est quelconque, elle est précisée par l'inclinaison locale au niveau de chaque élément de discrétisation (précisons que la plupart des modèles développés dans le contexte avec croissance tiennent compte de la géométrie initiale ; les fonctionnalités de ces modèles sont cependant différentes de ceux présentés ici).

➤ **Conditions aux limites**

Dans le cas d'un axe ligneux en port libre, les conditions aux limites sont données par la nature de l'encastrement. Pour un tronc, cet encastrement est l'ancrage racinaire. Pour une branche, c'est le point de liaison avec sa structure porteuse. La figure 1 montre une dissection anatomique de cet encastrement dans le cas d'un chêne (d'après Shigo 1990). L'imbrication des tissus entre la branche et la structure porteuse justifie le fait de considérer que l'angle à ce niveau ne varie pas. Dans le cas d'un tronc, la rotation du plateau racinaire sous l'effet d'une forte traction sur l'arbre a été observée par Milne. Pour prendre en compte cet effet, la rotation de l'angle à la base a été intégrée dans le modèle. Dans le cas d'une branche, même en considérant que l'encastrement est parfait, la flexion de la structure porteuse crée aussi une variation de l'angle à la base. Ce point est systématiquement pris en compte par notre modèle.

➤ **Propriétés matérielles**

Dans le cadre de poutres en flexion, les propriétés matérielles sont définies de façon suffisante par la valeur du module d'élasticité en tout abscisse. Pour tous les travaux présentés, y compris le nôtre, ce module est supposé uniforme. Cette hypothèse est assez forte, car on sait que cette valeur est susceptible de varier le long de l'axe, en fonction de l'âge des tissus et du diamètre. Nous avons montré, sur les simulations réalisées, que cette hypothèse ne permet pas toujours de rendre compte de façon satisfaisante des variations de courbure le long de l'axe. Notre modèle permet de tenir compte d'une variation linéaire de ce module en fonction de l'abscisse dans l'axe et du diamètre. Pour renseigner ces paramètres, il est nécessaire de procéder à une étude de la variabilité du module. Cette étude préliminaire a été réalisée, et n'a pas montré de variations significatives, c'est pourquoi nous les avons négligées dans l'application du modèle.

D'autre part, aucun des modèles présentés ne tient explicitement compte du comportement visco-élastique des matériaux. Le nôtre en tient compte de façon indirecte, en se basant sur un module de structure équivalent (V-1.1.2).

➤ **Nature et distribution des sollicitations**

Leiser et West s'intéressent à l'effet du vent sur les arbres. Mamada s'intéresse à l'effet de la neige, et nous nous intéressons à l'effet du chargement axillaire (charges pondérales dans ces deux cas). La nature de la sollicitation en elle-même importe peu : dès lors qu'on a fait le choix d'une résolution statique du problème, seul importe la résultante des forces agissant sur l'axe à différents niveaux. Ces forces impliquent une flexion de l'axe, et le problème peut en général être résolu par une formulation simplifiée, en se plaçant dans le plan de flexion. Tous les modèles présentés se basent sur une formulation plane du problème et une description de la structure dans un plan. Cette formulation est limitante si l'axe présente des sinuosités en trois dimensions ou s'il est soumis à des forces qui n'agissent pas dans le même plan. D'autres modèles, qui seront présentés dans le contexte avec croissance, tiennent compte d'une géométrie et des sollicitations dans l'espace.

La distribution des sollicitations diffère entre les modèles : Leiser et Mamada considèrent une force appliquée en un point unique, le centre de la couronne de l'arbre. Nous avons envisagé un chargement quelconque réparti le long de l'axe, tout comme dans le modèle de West et celui de Morgan. Nous avons négligé l'effet des bras de levier supplémentaires engendrés par les chargements axillaires distants. Ce point est par ailleurs négligé par les cinq autres modèles évoqués. Son effet, comme nous l'avons montré à partir des simulations, peut avoir des conséquences sur la qualité des simulations.

La direction des sollicitations par rapport à celle de l'axe diffère entre les modèles. Le modèle de Leiser se limite à l'étude d'un chargement orthogonal à la direction de l'axe. Celui de Mamada se limite à un chargement axial. Le modèle que nous avons développé ne tient compte que de chargements pondéraux (donc dans la direction verticale), mais envisage une forme quelconque de l'axe. Le chargement peut donc être axial (si l'axe est vertical) ou transverse (si l'axe est horizontal). Les modèles de West et de Morgan sont valables pour un chargement de direction quelconque.

➤ Calcul de la déformée

L'hypothèse de petits déplacements est une approximation courante pour les calculs en mécanique des poutres. Elle se fonde sur l'idée que les efforts calculés dans la position initiale sont une bonne approximation des efforts calculés dans la position finale. Morgan (citant Petty et Worrell, 1981) indique que celle-ci n'est valable que si le déplacement de l'extrémité ne dépasse pas 25% de la longueur de l'axe. Précisons que cette limite est valable dans le cas d'un chargement orthogonal à la direction de l'axe. Plus le chargement est axial, moins cette hypothèse est justifiée (cf. II-2.2), et plus la limite de validité de l'HPP se rapproche de 0. Dans le cas extrême du flambement d'un axe vertical (Timoshenko 1966), le déplacement calculé sous HPP sera toujours nul, alors que le déplacement réel peut être important.

Parmi les modèles étudiés ici, seul celui de Mamada se fonde sur cette hypothèse. Les modèles de Leiser, Morgan et West, ainsi que le nôtre, sont résolus en grands déplacements. Ils diffèrent cependant par la méthode de résolution. Le modèle de Leiser est fondé sur une formulation analytique du problème, et sur la résolution explicite de l'équation différentielle à laquelle il mène. La formulation de West se base sur une discrétisation de la structure en élément de poutre, et sur l'expression différentielle de l'équilibre pour chaque élément. Les équations obtenues sont alors résolues par la méthode des trapèzes, et il qualifie sa méthode d'« intégral-différentielle ». La formulation de Morgan est basée une expression matricielle de l'équilibre au niveau de chaque élément. Il utilise la méthode des matrices de transfert qui permet, partant d'une valeur arbitraire des efforts à la base de l'axe, de calculer par récurrence la géométrie et les efforts de chaque segment simultanément, en parcourant l'axe de la base vers l'apex. L'équilibre global est obtenu par itération de ce parcours, en corrigeant à chaque étape la valeur des efforts à la base. La méthode que nous avons mise en œuvre, inspirée de Blaise et al. (1992), est assez proche de cette dernière (cf. II-2). La différence réside essentiellement dans le fait que le calcul des efforts et la mise à jour de la géométrie sont découplés, et que l'axe est parcouru alternativement de la base vers l'apex et de l'apex vers la base. Ce double sens de parcours permet d'éviter l'utilisation d'une valeur arbitraire du moment comme point de départ des calculs. Une amélioration sensible de la méthode originale a été mise au point en introduisant un « coefficient d'amortissement » (cf. II-2.2). Cette amélioration a été développée en parallèle dans des modèles de simulation en croissance (Jirasek et al. 2000).

➤ Validation et applications

Différentes démarches ont été entreprises pour valider les modèles. La première démarche, réalisée pour les modèles fondés sur une résolution numérique du problème, consiste à confronter les sorties du

modèle à des formules analytiques. Il s'agit alors d'une simple vérification numérique des calculs. Morgan a ainsi validé son modèle sur un cas analytique simple de poutres en grands déplacements. Nous avons réalisé une démarche analogue sur le cas du flambement élastique. Dans les deux cas, la concordance avec la solution théorique est excellente.

Une seconde démarche consiste à confronter le modèle à l'expérimentation, après ajustement du module d'élasticité. Leiser a ainsi validé son modèle par des essais de flexion à masse imposée réalisés sur des tiges prélevées et encastées horizontalement dans un étau. Les données mesurées sont la longueur, le diamètre à la base et la conicité des tiges. Il réalise un ajustement du module de façon à obtenir une concordance entre le déplacement de l'extrémité calculé et observé. Il compare alors la déformée calculée et la déformée observée. La concordance entre les points observés et calculés n'est pas quantifiée, mais l'agrément visuel est bon. De plus, il réalise sur chaque tige des essais avec des masses croissantes. Au delà d'une certaine limite, le module ainsi estimé baisse, ce qui lui permet de déterminer la domaine d'élasticité linéaire du matériau.

Milne a validé le modèle de Morgan d'une manière analogue. Il étudie le tronc d'un épicéa de 11 mètres, tracté par un câble depuis le sol. Le tronc est divisé en segments d'un mètre dont il mesure le diamètre et la masse (après abattage). La déformée de l'arbre est comparée aux sorties du modèle, après ajustement du module sur la position du point d'application de la traction. La distance maximale entre les points observés et simulés est de 20 cm. Les auteurs analysent les sources d'erreur possible, et identifient des limitations à leur modèle : la variation de l'angle à la base (qu'ils prennent ensuite en compte), l'hypothèse de géométrie initialement rectiligne et les variations longitudinales du module d'élasticité. Cette démarche de validation est très proche de celle que nous avons réalisée après ajustement du module (V-1.1.4). Notons cependant la différence de critère d'ajustement : au lieu d'ajuster sur un point particulier, nous avons cherché l'ajustement qui minimise la somme des carrés des distances de tous les points.

Une démarche de validation plus poussée consiste à comparer les simulations aux observations à partir d'un ensemble de mesures indépendantes. Dans ce cas, le module d'élasticité ne peut être ajusté à partir de l'expérience sur laquelle se base la validation, mais doit être déterminé indépendamment. Morgan a validé ainsi son modèle à partir d'une barre de plastique encastée, dont le module a été déterminé par ailleurs. Sur cette structure homogène de géométrie régulière, il obtient une concordance pratiquement parfaite entre observation et simulation. C'est cette dernière démarche de validation que nous avons privilégiée (V-1.1.3).

Les modèles peuvent être exploités de différentes manières. Pour Leiser, Mamada, et West, l'objectif premier était de déterminer la répartition longitudinale des contraintes dans les troncs. Milne a appliqué le modèle de Morgan pour déterminer le module d'élasticité de structure d'un arbre sur pied. Le modèle de West a été plus récemment utilisé dans le même but, sur de jeunes troncs d'eucalyptus (Osler, West et Downes 1996). Nous avons utilisé notre modèle de manière analogue pour estimer le module de structure par essais de flexion *in situ*.

L'originalité de la démarche présentée à la partie V réside en trois points. Au lieu de s'appuyer sur une mise en charge artificielle, les validations se basent sur un chargement des axes en conditions naturelles (le poids des axillaires). Cette démarche a été possible grâce à l'identification d'une période où la croissance en diamètre est pratiquement nulle. Notons que la démarche est difficilement envisageable dans un contexte où la sollicitation étudiée est le vent, la sollicitation n'étant pas constante. De plus, nous avons exploité le modèle de façon à tester différentes hypothèses mécaniques, dont le choix n'a pas été fait *a priori*. Ceci nous a permis de mettre en évidence la nécessité de prendre en compte les grands déplacements et le rôle non négligeable de la visco-élasticité. Enfin, le test des

hypothèses et l'évaluation du modèle ont été fait en se basant sur plusieurs axes simultanément, et en analysant les sources d'erreurs à différentes échelles. Cette stratégie a permis d'identifier l'origine des inadéquations observées, en distinguant les déficiences globales du modèle, les spécificités inter-individuelles, et les variations intra-individuelles. Cette démarche a révélé la principale limite structurelle du modèle dans notre contexte d'application : l'absence de prise en compte des pousses longues. L'intégration de cette fonctionnalité est relativement simple d'un point de vue technique (Blaise et al. 1992). Son application requiert des mesures supplémentaires (position du centre de gravité de ces pousses). Le développement d'un outil intégrant cette fonctionnalité permettrait de tester son importance en comparant des résultats de simulation avec ou sans la prise en compte de ce facteur (d'une manière analogue aux tests hypothèses que nous avons réalisées pour les grands déplacements et la visco-élasticité).

1.2. Prise en compte de la croissance et de la maturation

La quantification de l'action de la croissance en diamètre, du chargement et de la maturation sur la forme des axes ligneux et la distribution des contraintes a été clarifiée par Fournier (1989). L'auteur a fourni une formulation mécanique tridimensionnelle de nombreux problèmes relatifs à la mécanique des arbres (Fournier et al. 1991b), ainsi que des formulations unidirectionnelles simplifiées qui en découlent (Fournier et al. 1991a). Ce travail a ouvert la voie à de nombreuses applications, notamment dans le domaine de la simulation de l'évolution de la forme des axes ligneux en croissance.

La modélisation de l'évolution de la forme d'une branche en croissance (Fournier et Moulia 1992; Fournier et al. 1994) a permis de simuler la forme en « S » couramment observée, et de mettre en évidence la sensibilité de la forme finale à la croissance diamétrale qui a lieu au cours des premières années de développement (nous désignerons ce modèle par « modèle de Fournier92a »). Un modèle de régulation biomécanique a été appliqué à la simulation du redressement d'un pin artificiellement incliné (Fournier et Moulia 1992; Fournier et al. 1994), et validé par l'expérience (« modèle de Fournier92b »). Un modèle simulant l'évolution des branches latérales de pin en croissance a été développé parallèlement à ces travaux (Castéra et Morlier 1991).

La simulation de l'architecture des arbres développée au CIRAD-AMAP (De Reffye et al. 1991) s'est vue enrichie d'une formulation permettant la prise en compte de la biomécanique (Blaise et al. 1992). De là est né le logiciel AMAP-méca, partie mécanique de la chaîne de simulation AMAP-para, fondé sur une formulation mécanique distincte (Fourcaud et Lac 1996; Alteyrac et al. 1999; Ancelin, Fourcaud et Lac 1999). Dans un autre contexte de modélisation de l'architecture des plantes, les « *L-system* » (Prusinkiewicz et al. 1997), la prise en compte de la biomécanique s'est faite plus récemment (Jirasek et al. 2000).

➤ Nature de la structure, sollicitations externes et conditions aux limites

Ces modèles diffèrent par la nature de la structure qu'ils modélisent. Dans AMAP-méca, et le modèle de Jirasek, la structure est un arbre entier. Ces modèles se basent donc nécessairement sur une formulation du problème dans l'espace, et non une formulation plane. Ils intègrent des sollicitations en flexion et torsion. D'autre part, ils prennent nécessairement en compte les variations de l'angle à la base des branches, liées à la déformation de la structure porteuse.

Les modèles de Fournier92a, Fournier92b, Castéra et le nôtre se limitent à l'analyse d'un axe en croissance. Ils se basent sur une formulation plane en flexion pure. Dans les modèles de Fournier92a et de Castéra, la structure est susceptible de croître en longueur, alors celui de Fournier92b et le nôtre se basent sur une structure de longueur fixe, et ne cherchent pas à modéliser les déformations du

prolongement. Parmi ces 4 modèles, seul le nôtre tient compte d'une variation de l'angle à la base. Signalons que la formulation dont sont dérivés les modèles de Fournier92a, Fournier92b et le nôtre tenait compte de ce point (Blaise et al. 1992).

Tous ces modèles tiennent compte du chargement pondéral. AMAP-méca a deux spécificités : d'une part, il prend en compte les bras de levier supplémentaires induits par les chargements axillaires distants ; d'autre part, il permet de tenir compte de l'effet du vent. Le modèle de Fournier92b, développé dans le contexte de l'étude de la régulation biomécanique de la forme, ne tient pas compte des chargements axillaires (seul le poids propre de la structure est intégré).

➤ **Propriétés matérielles**

Les propriétés mécaniques sont supposées homogènes dans les modèles de Castéra et Jirasek. Une variation longitudinale et radiale du module est intégrée dans la plupart des autres formulations (Blaise et al. 1992; Fournier et Chanson 1992; Fournier et Moulia 1992; Fourcaud et Lac 1996), ainsi que dans la nôtre. Cependant, elle n'est pas prise en compte dans les applications des modèles de Fournier92a, Fournier92b, ni dans la nôtre. AMAP-méca en tient compte, ainsi que d'une variation du module en fonction de la nature du bois (bois de réaction / bois normal).

➤ **Redressement actif**

Deux mécanismes de redressement actif sont envisagés. Le redressement « primaire » consiste en une réorientation de la direction de croissance au niveau de l'apex. Le redressement secondaire intervient par l'intermédiaire du bois de réaction, et des déformations de maturation.

Le redressement primaire est pris en compte dans tous les modèles qui tiennent compte de l'allongement de la structure (Castera et Morlier 1991; Fournier et Moulia 1992; Fourcaud et Lac 1996; Jirasek et al. 2000). Le redressement secondaire est pris en compte dans le modèle de Fournier92b, dans AMAP-méca et dans notre modèle par l'intermédiaire d'une loi de réorientation.

➤ **Calcul de la déformée**

Les premiers modèles développés se basent tous sur l'hypothèse de petits déplacements (Castera et Morlier 1991; Fournier et Chanson 1992; Fournier et Moulia 1992; Fourcaud et Lac 1996). Cette hypothèse a été par la suite abandonnée, et les modèles récents font les calculs en grands déplacements (Alteyrac et al. 1999; Jirasek et al. 2000). C'est pour cette méthode que nous avons opté.

Signalons qu'AMAP-méca a la particularité de résoudre le problème avec la méthode des éléments finis (Fourcaud et Lac 1996), alors que les autres modèles se placent dans une formulation plus classique du problème, analogue à celle que nous avons introduite à la partie II.

Nous avons abondamment commenté l'inadéquation de l'hypothèse des petits déplacements (ou hypothèse de petites perturbations, HPP) dans le cas d'un chargement instantané imposé à un axe. Il faut cependant ajouter ici quelques commentaires, pour comprendre pourquoi cette hypothèse a été acceptée initialement dans le contexte de structures en croissance, alors que la résolution en grands déplacements avait été envisagée comme alternative (Blaise et al. 1992; Fournier et Moulia 1992). La particularité de ce contexte mécanique est que l'on doit impérativement tenir compte de la dynamique conjointe de chargement et d'élaboration de la structure (Fournier 1989; Fournier et al. 1991a). Pour cela, il est nécessaire de raisonner à partir de courtes périodes pendant lesquelles la structure évolue peu. La discrétisation temporelle du problème est donc nécessaire. Dans ce contexte, on peut faire en sorte que les charges imposées durant chaque période soient suffisamment faibles pour que l'HPP se justifie. Ce raisonnement équivaut à la méthode du fractionnement de la charge, présentée au II-2.2.2, dont nous avons vu qu'elle convergeait vers la solution en grands déplacements moyennant le choix

d'une discrétisation adaptée. L'HPP est donc théoriquement toujours applicable. Le problème est que le pas de discrétisation doit être choisi d'autant plus petit que le chargement est axial et important. Notamment, pour un axe vertical, ce pas doit être choisi extrêmement fin. Nous avons illustré au II-2.2.3 les différences de performances numériques entre une méthode de calcul directe en grands déplacements et la méthode de fractionnement de la charge. Pour la modélisation d'un axe en croissance, chaque période de calcul comporte non seulement la recherche de l'équilibre mécanique, mais aussi la gestion de la croissance et de la maturation. Si le choix du pas de discrétisation temporelle est conditionné par des considérations mécaniques, l'ensemble du modèle doit s'y plier et les performances, en terme de temps de calcul, en sont fortement pénalisées.

A partir du moment où la discrétisation de la charge a été envisagée, l'HPP est conceptuellement valable, mais la résolution en grands déplacements est un choix plus judicieux du point de vue numérique.

➤ **Applications et validations**

La principale différence entre les modèles présentés dans cette section vient de la manière dont ils gèrent la croissance. Dans AMAP-méca (couplé à AMAP-para), ainsi que dans le modèle de Jirasek, le développement de l'arbre est entièrement simulé à partir de quelques paramètres globaux, conditionnant la croissance et la biomécanique. Ces modèles ne peuvent donc être utilisés que dans un contexte de pure simulation. Ils permettent d'étudier, compte tenu d'un ensemble de règles imposées par le modèle, l'effet de ces paramètres sur le développement des plantes. La validation de tels modèles reste problématique, et ne peut être envisagée que par une évaluation visuelle du réalisme des formes obtenues.

Dans les modèles de Castéra et de Fournier92a, l'utilisateur peut contrôler quelques paramètres globaux, ainsi que la quantité globale de croissance (primaire et secondaire) à chaque étape de simulation. Ces modèles permettent de se baser sur une part plus importante d'information exogène, qui peut être estimée à partir de données expérimentales. Cependant, le modèle simule la totalité du développement à partir de ces paramètres, et ne peut donc prendre en compte des données précises relatives à un individu particulier. L'exploitation des modèles se fait par une analyse de la sensibilité de la forme finale à la valeur des paramètres et la validation effectuée est visuelle.

Les modèles de Fournier92b et le nôtre ont la particularité de tenir compte d'une information exogène plus précise, dans l'espace et dans le temps. Ils peuvent donc être utilisés sur la base de données locales décrivant un individu particulier. Le modèle de Fournier92b a été validé à partir d'un pin artificiellement incliné à 45° (Fournier et Chanson 1992; Fournier et al. 1994). Le diamètre du pin a été mesuré au début et à la fin de la période d'observation. Sa forme a été mesurée par photogrammétrie à différentes dates. Les déformations résiduelles et la distribution du bois de tension ont été relevés après les observations. Les données de la simulation supposent que le tronc est initialement rectiligne. La dynamique de croissance n'est pas prise en compte de façon précise : les accroissements de diamètre de la simulation se basent sur une linéarisation de la croissance totale et les incréments de charges axillaires sont négligés. Le redressement est simulé en supposant que dès que l'axe est éloigné de plus de 2° de la verticale, il produit du bois de tension du côté qui le rapproche de la verticale. La valeur des déformations de maturation du bois de réaction est imposée à partir des mesures effectuées. La validation du modèle est faite par une comparaison visuelle entre les observations et les résultats des simulations, en se basant sur deux critères : la forme obtenue et la distribution du bois de tension. La concordance est qualitativement satisfaisante, mais quelques inadéquations locales sont notées. Les auteurs concluent en proposant la prise ne compte de lois de régulation biomécaniques plus sophistiquées. La démarche que nous avons entreprise est similaire à

celle-ci. Elle y apporte quelques améliorations, notamment la prise en compte de la forme initiale, du chargement axillaire, de la dynamique réelle de croissance et d'une loi de régulation biomécanique plus sophistiquée. D'autre part, la validation a été effectuée sur un plus grand nombre d'individus, et sur la base de critères quantitatifs.

On reviendra sur ces deux exemples au chapitre 4, concernant l'étude de lois de réorientation.

VI-2. Propriétés mécaniques du bois

2.1. Méthodologie des flexion 3 points sur tronçons

Comme nous l'avons dit au III-3.1, les mesures en flexion statique sur tronçons présentent plusieurs avantages. Leur mise en œuvre est simple et rapide et ne fait appel qu'à des observations directes, selon le mode de sollicitation prépondérant pour des structures élancées en conditions naturelles : la flexion. De plus, ils permettent d'obtenir directement une valeur qui intègre l'hétérogénéité matérielle sur la section, ce qui est la valeur pertinente pour qualifier la rigidité à la flexion d'un axe.

L'utilisation de ces essais sur des tronçons présente cependant quelques difficultés, liées surtout à l'irrégularité de la structure. L'application de formules classiques, établies dans le cadre d'éprouvettes usinées sans défaut, requiert un examen attentif des hypothèses sous-jacentes. Ces points ont été abordés au chapitre III-3. On y revient ici de façon critique.

La prise en compte de la conicité dans le dépouillement des essais de flexion a été envisagée (III-3.2.5 et annexe 6). La correction qu'elle implique (tirée de Young 1989) se traduit par une révision à la hausse du module estimé avec la formule classique. Elle est inférieure à 1% quand la différence entre les diamètres extrêmes du tronçon est inférieure à 25%. Cependant, cette correction peut être importante dans le cas d'un tronçon fortement conique (elle dépasse 50% pour un tronçon ayant une extrémité 4 fois plus grosse que l'autre).

D'autre part, nous avons montré au IV-2.1.2 que, dans les conditions où nous avons mesuré les tronçons, la compression radiale de l'écorce au niveau des appuis introduit une perturbation de la mesure. Cette perturbation est due à un poinçonnement, dont la prise en compte explicite n'est pas triviale. Elle intervient surtout si les tissus périphériques ont un module d'élasticité en compression faible. Elle peut être rendue négligeable si le déplacement du tronçon est suffisant.

Par ailleurs, on sait qu'en toute rigueur les déformations tranchantes (cisaillements) induisent un déplacement supplémentaire non nul du tronçon en flexion trois points. Leur effet peut être rendu négligeable si le tronçon est suffisamment élancé. La norme USDA (citée par Gartner 1991) impose que l'échantillon ait un rapport longueur/diamètre supérieur à 14. Ce point était vérifié pour notre échantillon (le rapport longueur/diamètre vaut 29 en moyenne), c'est pourquoi l'effet des cisaillements a été négligé. Cependant, ces cisaillements peuvent être pris en compte pour des échantillons insuffisamment élancés (la formule est fournie dans Cannell et Morgan 1987).

La détermination du module d'élasticité de tronçons entiers par essais de flexion est une méthode courante dans les études biomécaniques, pour quantifier l'aptitude à résister à la flexion (ou sa variabilité), au sein d'un individu (Rowe et Speck 1996; Briand et al. 1999; Niklas, Molina-Freaner et Tinoco-Ojanguren 1999) ou entre individus (Gartner 1991; Rowe et Speck 1996). Elle est le plus souvent faite dans les conditions où nous l'avons réalisée, c'est à dire à partir de la formule de base, qui ne tient compte ni de la conicité, ni de la compression radiale, ni des cisaillements (Gartner 1991; Rowe et Speck 1996; Niklas et Spatz 2000b). Les conditions de validité des différentes hypothèses sous-jacentes à l'application de cette formule sont contradictoires quand il s'agit d'un tronçon qui présente un défilement (ce qui est de façon très générale le cas des plantes ligneuses) : le tronçon doit être le plus court possible si on veut négliger la conicité, et le plus long possible si on veut négliger les autres modes de sollicitations. L'erreur induite par la violation de ces hypothèses peut être faible si le tronçon est choisi droit et élancé, mais cela n'est pas toujours possible. Par ailleurs, le fait d'avoir à choisir un échantillon en fonction de critères purement liés à la méthode peut être contraire avec

l'objectif de l'étude. De plus, les trois sources de perturbations que nous avons relevées agissent dans le même sens : le module d'élasticité est sous-évalué quand on en tient pas compte. Dans le cas où l'objectif est de détecter des différences entre génotypes (variétés, espèces) ou en fonction d'un autre facteur (le milieu, l'âge du tronçon, sa position dans l'axe), ces perturbations sont susceptibles d'induire un léger biais sur les résultats. C'est probablement le cas dans notre étude, bien que les précautions prises dans le choix des tronçons limitent cette erreur.

La prise en compte de ces effets pourrait être avantageuse, en ce sens qu'elle donnerait plus de liberté dans le choix des tronçons. La conicité et les cisaillements peuvent être pris en compte de façon très simple par des formules analytiques, à partir de données qui sont de toute façon mesurées sur le tronçon (longueur, diamètre, conicité). Des irrégularités longitudinales plus complexes de l'inertie (nœuds, défilement convexe ou concave), ainsi qu'une courbure initiale du tronçon pourraient être pris en compte par un modèle numérique de poutre simple, du type de celui qui a été développé dans le présent travail pour les essais *in situ*. La prise en compte de la compression radiale aux appuis est un problème tridimensionnel plus complexe, mais pourrait être envisagé, au moins à titre méthodologique (pour quantifier cet effet et préciser les conditions dans lesquelles il est négligeable), à partir d'une modélisation par éléments finis.

Le développement d'outils numériques (même relativement simples) pourrait constituer une avancée méthodologique à cet égard, en permettant aux utilisateurs de la biomécanique de mieux tenir compte de toute l'information mesurée. L'utilisation d'autres méthodes de mesures est une alternative, qui est développée dans ce qui suit.

2.2. Méthodes alternatives sur tronçons

D'autres méthodes sont utilisées pour évaluer le module de structure d'un tronçon d'axe. La flexion 4 points (des exemples d'utilisation peuvent être trouvés dans Rowe et al. (1996), Traiser, Reidelsturz et Speck (1997)) permet de supprimer l'effet des cisaillements. L'analyse du spectre acoustique (voir Bordonné (1989) pour la méthode, et Baillères (1994), Dumonceau (1995), Niklas (1995a) pour des exemples d'utilisation) est basée sur un principe différent. Elle fait appel à un appareillage plus sophistiqué que les bancs d'essai, mais présente l'avantage d'être très rapide à mettre en œuvre. Dans le cadre de l'application à des tronçons d'axes ligneux, ces deux méthodes restent cependant inféodées à l'irrégularité de la structure, et donc au choix d'hypothèses dans le modèle mécanique qui préside au dépouillement des essais.

La meilleure façon de contourner ces effets de structure est de réaliser des mesures sur éprouvettes usinées. La structure est alors entièrement maîtrisée par l'utilisateur, et peut être adaptée aux hypothèses du modèle. Dans ce cas, le module mesuré est représentatif du tissu dans lequel l'éprouvette a été taillée, mais il n'est en général pas représentatif de celui du tronçon entier (Cannell et Morgan 1987). Dans le cas de l'abricotier, le module sur éprouvettes a été trouvé supérieur à celui sur tronçons de 45% pour 'Lambertin' et de 74% pour 'Modesto' (Dumonceau 1995). La discordance entre les méthodes est attribuée, dans le cas du bois, à la participation à l'inertie de l'écorce, qui peut être importante (Cannell et Morgan 1987; Niklas 1999b). Dans le cas de notre échantillon, cette participation a été évaluée en mesurant le diamètre de tronçons avant et après écorçage (données non présentées). Elle est comprise en 50% et 60% pour la plupart des tronçons.

En toute rigueur, pour retrouver un module d'élasticité représentatif d'un tronçon à partir de mesures faites sur éprouvettes, il faudrait tenir compte de la distribution réelle des tissus et faire appel à un modèle composite. Deux catégories de données interviennent dans ce type de modèle : la distribution des différents tissus au sein de la section et les propriétés mécaniques de chaque tissu. La méthode de

calcul du module homogénéisé à partir de ces données a été présenté au II-1.2.5. La participation à l'inertie de chaque tissu peut être estimée en assimilant les zones de tissus à des formes paramétriques dont l'inertie est connue (Speck, Spatz et Vogellehner 1990; Niklas 1995a; Niklas et al. 2000). On peut aussi la mesurer directement par analyse d'image (Moulia 1993). L'avantage de cette technique est qu'elle n'est pas dépendante d'une distribution particulière des tissus. L'utilisation d'un modèle composite permet en outre, pourvu qu'on dispose de valeurs tabulées des propriétés mécaniques des différents tissus, de se baser entièrement sur des données d'anatomie pour estimer les propriétés mécaniques d'une tige. Cet élément est précieux en paléobotanique (Rowe 2000) ou quand le matériel ne permet pas d'utiliser les méthodes de mesure classiques (Moulia 1993). Ces modèles permettent en outre une interprétation plus poussée en anatomie fonctionnelle (Speck et al. 1990; Moulia 1993; Niklas 1993; Niklas 1994; Rowe et Speck 1996; Niklas et al. 2000) : pour une section hétérogène, on peut déterminer quels sont les tissus déterminants pour la fonction de soutien. D'autre part, le modèle composite peut être exploité "à l'envers", c'est à dire qu'il permet, connaissant la distribution des tissus et le module homogénéisé d'un grand nombre tronçons (déterminé, par exemple, par des essais de flexion), d'évaluer les propriétés des différents tissus par régression multiple.

L'utilisation d'un modèle composite, très riche, est aussi assez lourde à mettre en œuvre : il faut "décomposer" localement le tronçon en ses différents tissus (c'est à dire quantifier l'anatomie), puis le "recomposer" (c'est à dire mettre en œuvre le modèle composite). Cette démarche vaut la peine quand on profite pleinement de l'information qu'elle fournit (notamment en anatomie fonctionnelle ou quand le modèle se base uniquement sur l'information anatomique). Tant qu'on ne s'intéresse qu'aux phénomènes de flexion, la théorie des poutres nous permet prévoir le comportement de la structure sans connaître le détail de l'anatomie. Notre étude se situe dans ce cas, et l'utilisation d'un modèle composite n'a pas paru indispensable en première approche. La valeur homogénéisée sur la section est une méthode plus directe d'accès à l'information utile dans notre cadre de travail.

2.3. Mesures de modules de structure *in situ*

Les mesures sur tronçons sont locales, et ne sont représentatives que d'une portion d'un axe ligneux. Afin de caractériser les axes entiers, nous nous sommes intéressés aux variations longitudinales de ces valeurs (IV-2.1.3), pour tenir compte d'une éventuelle tendance dans le modèle de flexion. L'estimation du module de structure par essai de flexion sur axes entiers est une manière plus directe d'obtenir une valeur représentative de l'ensemble de l'axe. Cependant, comme nous l'avons souligné au III-3.1.2, le saut de l'échelle du tronçon à l'échelle de l'axe n'a pas, en théorie des poutres, le même statut que le saut entre l'échelle anatomique et l'échelle du tronçon. Le module de structure ne permet pas de rendre compte des déformations en tous points d'un axe s'il présente des variations longitudinales de module. Nous en avons montré des exemples à la partie V.

Ces essais constituent néanmoins la manière la plus directe de caractériser un axe par une valeur unique d'élasticité. La méthode que nous avons mise en œuvre est très générale, puisqu'elle tient compte de toute l'information nécessaire sur la géométrie initiale de l'axe, et qu'elle est basée sur des hypothèses mécaniques peu contraignantes (prise en compte de la variation de l'angle à la base, des grands déplacements, éventuellement du poids propre et d'un pré-chargement). La principale limitation est liée à la mesure de la géométrie par digitalisation, qui est inféodée à diverses contraintes (cf. III-2.3.1).

Des démarches analogues d'estimation de l'élasticité de structure tenant compte des grands déplacements ont été faites sur des axes de diamètre comparable aux nôtres (Leiser et Kemper 1973;

Osler et al. 1996), ou sur des troncs d'arbres plus âgés (Morgan et Cannell 1987; Milne et Blackburn 1989). L'originalité de notre modèle par rapport à ceux-ci a été détaillée au chapitre 1 de cette partie.

D'autre part, nous avons développé à partir du même modèle un essai de fluage *in situ* permettant d'évaluer la composante visco-élastique du comportement mécanique des axes *in vivo* hors période de croissance. Ce type d'essai est à ma connaissance sans précédent dans la littérature. Ces essais ont montré que la composante visco-élastique a un effet non négligeable sur la flexion à long terme, se traduisant par une diminution de 15% en moyenne du module d'élasticité. L'importance de cet effet avait été soupçonné lors de travaux antérieurs (Fournier et Chanson 1992).

2.4. Valeur et variabilité des propriétés élastiques mesurées

O. Dumonceau (1995) a réalisé les mesures d'élasticité sur des tronçons d'abricotier non écorcés âgés de 4 ans, avec la méthode d'analyse de fréquences propres de vibrations (Bordonné 1989). Il trouve un module moyen de 5946 MPa pour 'Lambertin' et de 4995 MPa pour 'Modesto', sans différence significative entre les variétés. Ces valeurs sont significativement inférieures à celles que nous avons déterminées en flexion 3 points (cf. IV-2.1.1) sur des rameaux plus jeunes. La discordance entre les résultats peut être attribuée autant à la différence de méthode qu'à la différence de matériel. Les mesures faites par analyse vibratoire sur des tronçons écorcés et des éprouvettes usinées (Dumonceau 1995) n'ont pas non plus permis de détecter de différence significative entre les deux variétés étudiées. Les différences numériques trouvées entre les moyennes par variété pourraient sans doute être rendues statistiquement significatives moyennant un échantillon plus important, mais sont en tout état de cause trop faible pour expliquer les différences de port (elles ne sont pas « biomécaniquement significatives »). Les mesures que nous avons effectuées sur tronçon et celle d'O. Dumonceau ne mettent pas non plus en évidence d'évolution des propriétés mécaniques en fonction de l'âge des organes.

Les mesures que nous avons réalisées *in situ* sont en moyenne inférieures de 20% à celles mesurées sur tronçons. Ce fait est d'autant plus difficile à expliquer que nous avons établi que la valeur réelle de l'élasticité des tronçons était plutôt supérieure à celle estimée, ce qui accentue encore cette différence. Diverses raisons ont été invoquées : il peut s'agir d'un effet de l'âge ou de l'époque de mesure, qui induirait une modification de la participation des différents tissus, et donc de la rigidité. Les effets élastiques non linéaires et visco-élastiques peuvent aussi jouer un rôle, étant données les différences d'intensité et de durée de sollicitation. Aucune réponse définitive n'a été apportée à cette question.

VI-3. Morphologie et géométrie des axes

La qualification de la morphologie et de la géométrie d'axes ligneux d'un an a été entreprise dans divers contextes d'application et sur diverses espèces. Chez les espèces fruitières, une démarche relativement classique consiste à classer les rameaux en types, en fonction de leur longueur et leur durée de croissance (Rivals 1965; Clanet et Salles 1974; Crabbé 1987). En particulier, Rivals (1965) a défini quatre classes de rameaux chez l'abricotier, selon la durée de croissance et leur aptitude à développer des organes néoformés. Notons également l'existence d'autres classifications, comme cela proposée par Tsonev et Tsoneva (1995) qui considèrent cinq classes de rameaux, mais qui nous semble moins pertinente car ne reposant pas sur des observations morphologiques claires.

Par rapport à ces travaux antérieurs, la classification que nous avons utilisée, considérant seulement deux classes de longueur de rameaux, est clairement une simplification. Cependant, ce choix reste compatible avec les travaux cités précédemment et se justifie dans notre contexte d'application dans lequel la longueur d'un rameau n'a d'importance que du point de vue de sa masse et de son bras de levier par rapport à son axe porteur.

3.1. Représentativité du matériel étudié

L'analyse présentée dans ce mémoire se base entièrement sur le suivi de 40 axes par variété pendant une seule année de croissance. Il est donc important de se poser la question de la représentativité du matériel étudié. En particulier, nous devons vérifier si les phénomènes mesurés ne sont pas liés à une particularité climatique de l'année de croissance ou à un effet de l'âge des arbres. Pour cela, les résultats seront comparés à plusieurs études réalisées ces dix dernières années sur l'abricotier, dans la région Languedoc-Roussillon, soit par des étudiants accueillis dans notre unité de recherche, soit par des travaux entrepris au centre technique interprofessionnel (CTIFL) à Balandran. Notamment, un suivi de croissance et de flexion a été réalisé au verger de Melgueil à l'occasion d'un stage en 1995 (Chambon 1995). Ce suivi a été pratiqué sur 40 axes long monocycliques de 1 an des variétés 'Lambertin' et 'Modesto', alors que les arbres étaient dans leur troisième année de croissance. Ce travail constitue donc une référence privilégiée pour juger de la représentativité de notre matériel.

➤ Dimension et forme initiales des axes

Les dimensions initiales des axes d'un an que nous avons mesurées (longueur et diamètre) sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Chambon 1995), ainsi que par Okasha et Crane (1963), en Californie et sur d'autres variétés. Par ailleurs, les dimensions des axes échantillonnés par Chambon (1995), confirment le fait que la variété 'Modesto' a des axes plus élancés que 'Lambertin'. Cependant, il faut noter que ces axes ont des dimensions particulièrement élevées, et qu'ils correspondent à des rameaux vigoureux, parfois appelés « gourmands ». En effet, la limite utilisée pour qualifier les rameaux longs est souvent de l'ordre de 50-60 cm (Clanet et al. 1974; Fournier D 1994). Ce caractère explique notamment la faible floribondité observée par ailleurs sur ces rameaux. En effet, la charge en fruits que nous avons observée, pour les variétés 'Palsteyn' et 'Modesto', est plutôt inférieure à ce qu'on pouvait attendre de ces variétés, réputées floribondes sur rameaux longs. Cette faible floribondité implique qu'une partie importante des axes que nous avons suivis ne portaient pas de fruit au moment de la récolte. Notons enfin que la position des fruits que nous avons observée sur la partie distale des UC longues est cohérente avec les observations antérieures (Clanet et Salles 1974).

Concernant la quantification du dimensionnement des axes d'un an, l'existence de relations d'allométrie entre longueur et diamètre a été exploitée par de nombreux auteurs (Causton et Venus 1981; Niklas 1994; Niklas 1995b; Costes, Fournier et Salles 2000; Suzuki et Hiura 2000). Kervella et al. (1994) ont montré, chez le pêcher, que le rapport longueur/diamètre diffère selon le génotype et proposent d'utiliser ce critère pour la sélection de nouvelles variétés.

Nos observations sur l'orientation et la forme initiale sont cohérentes avec les descriptions générales des variétés étudiées (Lichou et Audubert 1989; Lichou et Jay 1998), mais la comparaison de nos résultats avec ceux de Chambon (1995) est contradictoire. Cet auteur a observé que 'Lambertin' a des axes initialement très dressés et rectilignes, ainsi que nous l'avons quantifié. Par contre, il fait remarquer que les axes de 'Modesto' sont, dès le début de la saison, moins verticaux que ceux de 'Lambertin'. Cette observation est contraire à la nôtre, ainsi qu'à d'autres résultats bibliographiques : le port de 'Modesto' est qualifié de très dressé avant de s'ouvrir sous la charge en fruits (Lichou et Audubert 1989; Lichou et Jay 1998).

➤ **Dynamique de chargement : croissance végétative axillaire et mise à fruits**

Dans cette étude, la charge axillaire a été estimée grâce à des relations d'allométrie entre les dimensions des rameaux et des fruits, et leur masse. Là encore, une démarche similaire avait été conduite par Chambon pour 'Lambertin' et 'Modesto'. Nos résultats sont tout à fait analogues, pour les deux types de productions axillaires. D'autre part, Chambon a observé le fait que le prolongement de l'axe est peu développé pour la plupart des axes (très inférieur à la taille de l'axe lui-même). Cette observation concorde avec la nôtre, ainsi qu'avec des travaux antérieurs montrant la réduction progressive des croissances successives chez l'abricotier (Costes et al. 1992). Ceci justifie le fait de se baser sur une structure de longueur constante pour la formulation du problème mécanique. Cependant, la réduction que nous avons observée a été particulièrement intense et ne peut être considérée comme un caractère général : rappelons que, pour notre échantillon comme pour celui de Chambon, les axes ont été induits par une taille d'hiver sévère, pratiquée l'année précédente. Cette taille, qui a stimulé le développement de rameaux longs, n'a pas été renouvelée l'année du suivi.

La dynamique de croissance des fruits que nous avons observée, comporte une première phase de grossissement, suivie d'une période de stagnation correspondant au durcissement du noyau, puis d'une accélération du grossissement jusqu'à la maturité, ce qui est conforme au schéma classique du développement des fruits de l'abricotier décrit par Lilleland (1930), Jackson et Coombe (1966) et plus récemment par Costes et al. (1995a) sur la variété 'Rouge du Roussillon'. D'autre part, les dates de floraison et de maturité observées pour nos variétés sont conformes à la littérature (Lichou et Audubert 1989).

Le rythme de croissance des pousses est lui aussi conforme aux observations antérieures. Le débourrement est observé une semaine après la pleine floraison pour la variété 'Fantasme' (Costes et al. 2000) et deux semaines après pour 'Rouge du Roussillon' (Costes et al. 1995a). Pour ces deux mêmes variétés, le déploiement des parties préformées des pousses se fait en deux semaines environ et le démarrage de la seconde unité de croissance s'observe entre 50 et 60 jours après pleine fleur (Costes et al. 1995a; Costes et al. 2000). L'arrêt progressif des pousses en seconde croissance est observé jusqu'à 140 jours après pleine fleur pour 'Fantasme' (Costes et al. 2000) ; cette date concorde avec nos observations pour 'Palsteyn', mais l'arrêt a été constaté quelques semaines plus tôt pour 'Lambertin' et 'Modesto'.

Soulignons enfin que la proportion de pousses longues (monocycliques et polycycliques) que nous avons observée pour 'Lambertin' et 'Modesto' est plutôt faible au regard des travaux antérieurs. Ce

fait peut-être en grande part attribué à l'état des arbres, qui étaient assez âgés et n'ont été que très peu taillés au cours de leur développement. La réduction progressive des croissances en longueur, montrée chez l'abricotier par Costes et al. (1992), se traduit par une raréfaction des pousses longues à l'échelle de l'arbre.

➤ **Dynamique de flexion des axes**

Très peu de mesures quantitatives sont disponibles concernant la dynamique de flexion des axes. Sur ce domaine, nos observations sont globalement cohérentes avec diverses observations qualitatives ou semi-quantitatives faites sur des axes fructifères de 'Modesto' et 'Lambertin' (Chambon 1995; Lichou et Jay 1998) indiquant des flexions du même ordre de grandeur que celles que nous avons observées au moment de la maturité des fruits. Aucune information n'a par contre été trouvée concernant la flexion sous le poids des feuilles, non négligeable, observée pour les rameaux sans fruits. La présence de nombreux rameaux de ce type chez les trois variétés que nous avons suivies ne semble pas être un fait habituel, et est susceptible de biaiser nos observations dans le sens d'une sous-estimation de la flexion moyenne et de la participation des fruits. L'analyse séparée des échantillons avec et sans fruits qui a été réalisée permet de tenir compte de ce fait.

La flexion sous l'effet des fruits et le redressement à la récolte ont été observés par Chambon en 1995. Celui-ci a montré que 'Modesto' fléchit nettement plus que 'Lambertin', ce qui est conforme à nos observations. Par contre, il observe que 'Modesto' se redresse aussi de façon plus intense. L'observation de ses données montre que, si le redressement est effectivement plus important pour 'Modesto', cela n'est vrai qu'en valeur absolue : rapporté à l'intensité de la flexion sous fruits, 'Modesto' se redresse relativement moins que 'Lambertin', tout comme nous l'avons remarqué.

3.2. Relations entre dimensionnement des axes, flexion et croissance

➤ **Rôle mécanique de l'élanement**

L'importance des paramètres de dimensionnement des axes pour expliquer les différences d'intensité de la flexion entre variétés a été amplement soulignée dans les parties IV et V de ce mémoire. Ce fait avait déjà été remarqué par Chambon (1995), qui attribue les différences de flexion entre 'Lambertin' et 'Modesto' à leurs différences de diamètre. Cette remarque ne tenait pas compte des autres facteurs, notamment les différences de longueur, mais la prise en compte a posteriori de ce facteur en confirme la pertinence. Dans un autre contexte mais toujours sur le genre *Prunus*, le port pleureur d'un cerisier du Japon (induit par un traitement hormonal sur un cultivar dressé) a été attribué à un déséquilibre entre croissance primaire et secondaire, c'est à dire à une augmentation de l'élanement des branches (Nakamura, Saotome et Tanaka 1995). De même, l'implication du rapport diamètre/longueur dans le comportement mécanique est suggéré, chez le pêcher, par Kervella et al. (1994). L'importance fondamentale du dimensionnement des axes pour comprendre la stabilité structurale des arbres est par ailleurs bien connue dans les domaines de l'écologie et de la foresterie.

➤ **Lien entre le dimensionnement et la forme initiale**

Les corrélations établies entre géométrie et morphologie initiale (relevées au 1.2.2 de la partie IV) peuvent être interprétées en terme de croissance / flexion durant l'année de mise en place des rameaux. Nous avons noté que, notamment en ce qui concerne la variété 'Lambertin', les axes les moins dressés sont aussi ceux qui ont le plus faible diamètre, et qui sont les plus élancés. L'interaction entre morphologie et géométrie est complexe, et deux interprétations peuvent être données à ces corrélations. Le mécanicien aura tendance à voir la forme fléchie comme une conséquence du faible diamètre, qui n'a pas permis à l'axe de se maintenir vertical pendant sa première année de croissance.

Inversement, le biologiste aura tendance à interpréter les faits en terme d'allocation de ressources, et à voir la faible croissance diamétrale de l'axe comme une conséquence de son inclinaison, qui pénalise sa croissance dans son ensemble. Cette dualité d'interprétation souligne la complexité des relations qui existent entre forme et croissance.

➤ **Lien entre le dimensionnement initial et la croissance végétative de l'année suivante**

Au paragraphe 1.3.5 de la partie IV, diverses corrélations ont été relevées entre les dimensions initiales des axes et la croissance végétative réalisée en début de saison (première UC). La masse totale des UC1 est très fortement corrélée au diamètre initial des axes, pour les trois variétés. Ceci tend à montrer qu'il existe un équilibre entre le diamètre d'un axe et la quantité de pousses qu'il produit. L'observation des relations (fig. IV-57) montre que cet équilibre diffère entre les variétés : à diamètre égal, 'Palsteyn' produit une quantité de pousses bien supérieure aux autres variétés. La susceptibilité des variétés à la flexion, indépendamment de l'effet des fruits, peut donc en grande partie s'expliquer par la position de cet équilibre végétatif.

Nous avons noté une corrélation fortement positive entre la position des pousses et la conicité initiale (les axes les plus coniques ont des pousses situées en position distale) et négative avec l'élanement (les axes élancés ont tendance à avoir un chargement équi-réparti). D'un point de vue mécanique, ce comportement tend à minimiser la flexion : l'élanement implique une plus grande susceptibilité à la flexion, compensée par la répartition du chargement ; réciproquement, la conicité augmente la stabilité des axes, et leur permet de supporter les charges distales.

Par ailleurs, étant donné que la croissance en diamètre ne démarre qu'après le déploiement de l'essentiel des UC1, les corrélations entre dimensionnement initial et croissance végétative peuvent être directement interprétées de façon causale : la distribution de la croissance végétative en UC1 apparaît ici comme une conséquence de la morphologie initiale des axes porteurs. Cette vision des choses est contraire à la conception courante des relations entre croissance primaire et secondaire (Shinozaki et al. 1964; Kozlowski 1971), qui se focalise sur la distribution de la croissance primaire et donne un rôle passif à la composante diamétrale, en considérant que celle-ci s'ajuste à la première. Cette remarque -quelque peu spéculative- déborde largement du cadre de ce travail, mais est destinée à illustrer la complexité des interactions entre croissance primaire, croissance secondaire et forme des axes, qui est l'un des objets de l'étude de l'architecture des arbres.

3.3. Importance de la dynamique de croissance diamétrale

L'analyse de la dynamique de croissance diamétrale a montré que celle-ci se fait de façon rythmique dans l'année : pour les trois variétés, elle est très faible en début de saison, puis s'accélère peu après la fin du déploiement des UC1. Elle se ralentit ensuite fortement au début de la croissance des UC2, avant de reprendre fortement jusqu'à la fin de la saison végétative (figures IV-69 à IV-74). Des faits pratiquement analogues ont été observés lors d'un suivi simultané de croissance primaire et secondaire sur la variété 'Fantasme' (Costes et al. 2000). L'alternance entre périodes de croissance des pousses et périodes de croissance cambiale est interprétée en termes physiologiques comme l'indice d'une concurrence possible entre le cambium et les méristèmes primaires. Ces faits soulignent, à la suite de Barnola et Crabbé (1993), le fait que la croissance diamétrale n'est pas uniquement une composante passive du développement de l'arbre. En outre, ces transitions concordent avec les principales périodes de chutes de fruits (chutes physiologiques et récolte). Ces périodes apparaissent comme des périodes de réorganisation générale des relations trophiques au sein de la plante.

Le fait que la croissance en diamètre est faible à certaines périodes de l'année et intense à d'autres périodes a plusieurs conséquences d'un point de vue biomécanique.

Tout d'abord, cela remet en cause la pertinence d'un pas de temps annuel dans les modèles mécaniques qui tiennent compte de la croissance (Fourcaud et Lac 1996). D'autre part, l'existence d'une période à faible croissance en diamètre au début de la saison, alors que le chargement est important, permet d'appliquer une formulation mécanique classique (sans croissance). Cette période a été observée par ailleurs sur d'autres espèces ligneuses (Yoshizawa, Okamoto et Idei 1986), ce qui permet d'envisager une démarche de validation du modèle similaire à celle qui a été présentée dans la partie V. L'avantage est que la validation à partir de données mesurées peut se faire pas à pas, en traitant dans un premier temps les questions purement mécaniques, avant d'introduire les problèmes liés à l'interaction avec la croissance diamétrale.

Enfin, et c'est là un résultat majeur de ce travail, la dynamique conjointe de croissance en diamètre et de chargement a un impact important sur la rémanence de la flexion, dans le cas de chargements temporaires tels que les fruits. L'importance de la dynamique relative de croissance et de chargement avait été notée par Fournier et Chanson (1992). Le redressement à la récolte compense d'autant moins la flexion que la croissance secondaire a été intense pendant la période sous charge. Nous avons montré que ce facteur est susceptible d'expliquer en grande partie le fait que le port de la variété 'Modesto' s'ouvre au cours de la croissance de l'arbre. Ce fait est confirmé, bien que de façon moins nette, par les données de Chambon (1995). La phénologie a donc un impact direct sur le port. En outre, ce fait pourrait expliquer en partie les variations de forme des arbres entre régions ayant des climats différents : si les conditions climatiques retardent la mise à fruit par rapport à la croissance en diamètre, le redressement à récolte devrait être inférieur, et l'affaissement des arbres accéléré.

VI-4. Réorientations actives et bois de tension

4.1. Déformations résiduelles et déformations de maturation

Nous avons montré au IV-3.2, sur la base de mesures et de raisonnements mécaniques, que la mesure des déformations résiduelles longitudinales n'était pas une méthode fiable d'estimation des déformations de maturation dans le cas des axes que nous avons suivis, caractérisés par un faible diamètre et des réorientations de grande envergure. Deux raisons se cumulent pour montrer que cette méthode, éprouvée dans le cas de troncs verticaux et rigides (Fournier et al. 1991b; Baillères 1994), n'est pas applicable dans notre contexte d'étude. D'une part, dans le cas d'axes de petit diamètre, une partie non négligeable des déformations de maturation sont effectivement exprimées, et ne sont donc plus présentes dans les déformations résiduelles (invalidation de l'hypothèse $DRLM=DLM$). D'autre part, d'autres sources de déformations d'origine purement mécaniques peuvent participer à la déformation résiduelle (invalidation de l'hypothèse $DRL=DRLM$). C'est le cas de la flexion sous le poids des fruits ou du redressement à récolte, importants chez les fruitiers. Dans notre cas, le redressement à récolte a probablement induit une compression en face supérieure et une tension en face inférieure, inversant le différentiel de déformation mesuré lorsque la mesure se situe après récolte.

De plus, nous avons montré dans ce travail que la croissance en diamètre et les variations de chargement ne vont pas nécessairement de paire. Ainsi, en début de printemps, la croissance cambiale n'a pas démarré et les couches périphériques de l'axe sont constituées du bois final de l'année précédente. Par contre, la croissance pondérale et la flexion ont déjà eu un effet important. On risque fort alors de mesurer une déformation d'origine essentiellement passive. Cette interprétation permet de resituer nos résultats vis à vis de ceux obtenus d'une part par Dumonceau (1995) et d'autre part par Yoshida et al. (1999, 2000).

➤ Comparaison aux résultats de Dumonceau

En effet, Dumonceau (1995) avait également pratiqué des mesures de déformations résiduelles sur des branches charpentières des variétés 'Lambertin' et 'Modesto'. Or, ses observations ne concordent pas avec les nôtres. Il trouve les résultats classiquement observés, à savoir un retrait important en face supérieure des axes et un retrait faible en face inférieure. Compte tenu du fort diamètre des axes sur lesquelles les mesures ont été effectuées, il est probable que l'hypothèse $DRLM=DLM$ soit ici vérifiée, c'est à dire que, sur la zone de mesure, la plupart des déformations de maturation ont été bloquées. En outre, le caractère saisonnier des réorientations permet de donner une explication à la discordance avec nos résultats. Ses mesures ayant été faites au printemps, aucune phase de redressement passif n'a eu lieu pendant la mise en place des couches périphériques. L'hypothèse $DRL=DRLM$ n'est donc pas invalidée dans ce cas, ou du moins ne l'est-elle pas dans le sens d'une compression supplémentaire en face supérieure. Au contraire, le printemps est une période de flexion des axes, et cette flexion est susceptible d'accentuer le différentiel de DRL mesuré en augmentant la tension en face supérieure, et en la diminuant en face inférieure. Cette remarque est confirmée par le fait que, sur quelques points de mesure, une compression a été relevée en face inférieure.

➤ Comparaison aux résultats de Yoshida

Une interprétation similaire peut être donnée aux mesures de déformations résiduelles pratiquées sur des cerisiers pleureurs du Japon (Yoshida et al. 1999; Yoshida et al. 2000). Les axes étudiés par cet auteur sont âgés de 1 an, de direction oblique à horizontale, et d'un diamètre inférieur à 1 cm. Ils sont

donc *a priori* sujets à une forte violation des deux hypothèses. Dans un premier travail (Yoshida et al. 1999), l'auteur compare les déformations résiduelles entre des axes témoins et des axes soumis à un traitement à l'acide gibbérellique, qui stimule la production de bois de tension et supprime le port pleureur chez cette variété. Sur les axes témoins, et en quelques points des axes traités, il trouve des déformations en compression sur la face inférieure (figure 2). Supposons que l'effet du bois de tension ait pratiquement compensé la flexion passive chez les axes traités, dressés, alors qu'il a été très insuffisant pour la compenser chez les témoins, pleureurs. Dans ce cas, la perturbation par la flexion induit une compression en face inférieure, faible pour les axes traités, et forte pour les axes témoins. Cette hypothèse pourrait constituer une explication des valeurs de compression mesurées. De plus, la théorie des poutres nous indique que la flexion des témoins, si elle induit une compression en face inférieure, induit nécessairement une tension symétrique²⁴ en face supérieure. La tension mesurée en face supérieure de ces axes pourrait donc pour partie être due à la flexion passive. Cette hypothèse suggère que les déformations de maturation en face supérieure pourrait être inférieures aux déformations résiduelles mesurées pour cette modalité, et la différence entre les modalités s'en trouverait accentuée.

Dans un autre travail (Yoshida et al. 2000), le même auteur réalise des mesures de déformations résiduelles sur le même type d'axes, en comparant cette fois des axes témoins à des axes soutenus pendant leur croissance (et donc non fléchis). Les résultats (figure 3) montrent de nouveau une compression importante en face inférieure pour les témoins, mais pas pour les axes soutenus. Bien que ce n'en soit pas l'objectif premier, ces observations mettent en évidence l'intervention de la flexion passive, par ailleurs notée par l'auteur. En poursuivant l'interprétation que je propose, on ne peut exclure le fait que, là encore, la compression passive en face inférieure ait pu être accompagnée d'une tension passive symétrique en face supérieure.

Finalement, nos résultats nous conduisent à suggérer que l'interprétation des mesures de déformations résiduelles est contingente à la dynamique de la flexion, en particulier dans le cas d'axes soumis à de grands déplacements. Ceci nous amène à souligner la difficulté à interpréter la mesure. Le travail effectué a permis de montrer que, pour des axes de petit diamètre soumis à des réorientations intra-annuelles importantes, le lien entre ces deux mesures est beaucoup moins direct que dans le cas d'axes rigides et statiques. La valeur de la déformation de maturation sur de petits axes n'en reste pas moins une information précieuse pour l'analyse de leur comportement biomécanique. Pour y avoir accès, différentes voies sont envisageables.

Une première possibilité est de tenir compte des perturbations, en réalisant une modélisation de la mesure, qui tienne compte de la dynamique de croissance radiale et de déformation au niveau de la zone de mesure, pendant toute la période de mise en place des tissus périphériques sur lesquels la mesure est réalisée. Une telle démarche a été proposée dans le contexte forestier par Sassus (1998), en effectuant une modélisation numérique de la mesure. Cette voie n'a pas été explorée au delà de raisonnements qualitatifs dans ce mémoire, bien que l'information nécessaire ait été mesurée.

➤ Apports et limites d'une amélioration métrologique

Dans l'analyse des mesures de déformation, nous avons jusqu'ici volontairement éludé toute considération métrologique, afin de mettre l'accent sur le problème de l'interprétation de la mesure. Le choix d'un dispositif de mesure a pourtant des conséquences importantes que nous allons examiner à présent. En premier lieu, le simple poids du capteur est susceptible, sur des axes de petits diamètres,

²⁴ en toute rigueur, la valeur absolue de la déformation n'est pas nécessairement égale des deux cotés si les propriétés matérielles sont hétérogènes sur la section. Elle est néanmoins du même ordre de grandeur.

d'induire une perturbation mécanique non négligeable. Ce peut être le cas pour les mesures que nous avons réalisées sur des petits axes. L'utilisation d'un capteur plus léger permet de limiter cet artefact. D'autre part, l'effet de la ruine de la structure occasionnée par la découpe peut ne pas être négligeable sur les mesures que nous avons réalisées. D'autres paramètres sont d'importance, comme la méthode de libération des contraintes, la longueur et la profondeur de la zone de mesure... Nous n'entrerons pas dans le détail de ces divers points, pour se concentrer sur la question suivante : dans le cas de petits axes libres de se réorienter, que peut apporter une amélioration métrologique ? En admettant qu'on soit capable de mesurer avec une grande fiabilité l'état réel des déformations résiduelles dans n'importe quelle zone, dans quelle mesure est-on capable de s'approcher de la valeur des déformations de maturation ?

Afin d'être certain que les déformations de maturation sur cette zone sont entièrement bloquées (c'est-à-dire vérifier l'hypothèse $DRLM=DLM$), il faudrait réaliser une mesure très locale, c'est-à-dire intégrée sur une faible épaisseur. Le problème qui se pose alors est celui de la représentativité de la mesure. Le bois de tension n'est pas nécessairement un tissu continu et homogène. Dans le cas du peuplier et du hêtre, il est distribué en fines bandelettes (Sassus 1998). Il n'est pas non plus présent à tous les niveaux du cerne (Wicker 1979). Le risque est dans ce cas d'obtenir des résultats très variables, dépendant de singularités anatomiques locales. Par ailleurs, le fait d'avoir une mesure locale n'implique pas nécessairement l'absence de perturbation mécanique. Ainsi, comme nous l'avons dit précédemment, on risque fort alors de mesurer une déformation d'origine essentiellement passive. Ceci est d'autant plus dangereux que le différentiel de déformation mesuré peut être analogue (en signe et en ordre de grandeur) à celui créée par la maturation.

Une amélioration métrologique ne peut donc améliorer la fiabilité de la mesure que si elle est accompagnée d'une interprétation adéquate de la mesure. La mesure n'est valable que si, depuis la mise en place des tissus sur laquelle elle est pratiquée, l'axe n'a pas subi de réorientation significative (quelle que soit leur origine). Le maintien artificiel de l'axe en position, ou le choix d'une date de mesure adéquates, peuvent constituer des solutions au moins partielles.

➤ **Alternative à la mesure des DLM : analyse de la distribution du bois de tension**

D'autres méthodes permettent d'évaluer l'intensité du redressement actif dans un axe ligneux. La méthode la plus directe est l'observation du redressement effectif, en mesurant la variation d'inclinaison ou de courbure de l'axe. Cette méthode est rarement directement applicable, car les réorientations observées dépendent aussi de la variation de chargement, en général concomitante. Cependant, dans une période telle que celle que nous avons observée en fin de saison, où la variation de chargement axillaire est quasiment nulle, cette observation directe présente un intérêt. Le redressement observé est égal à la différence entre le redressement actif et la flexion passive causée par le poids de nouvelles couches de bois. Ces deux effets ne peuvent être découplés sans une analyse mécanique précise. Il n'est cependant pas toujours nécessaire de les découpler. Si l'objectif est de comparer, sur différents axes, l'efficacité des mécanismes de redressement actif liés à la croissance en diamètre, cette simple observation donne une information synthétique et pertinente.

La méthode que nous avons privilégiée est la quantification de la distribution du bois de tension (BT). Le BT est vu comme un indicateur anatomique de l'intensité des déformations de maturation. Cette démarche est soutenue par le fait que les valeurs de déformations de maturation sont nettement plus importantes dans ce tissu que dans le bois normal. Elle présente cependant ses limites. L'idée sous-jacente à la démarche est que les déformations de maturation ont une valeur bien définie au niveau de chaque tissu (BT et bois normal). La réalité est en fait plus complexe. En effet, la valeur des déformations de maturation du BT n'est pas nécessairement identique chez différentes espèces

(Fournier 1992). Cette démarche ne permet pas de détecter, le cas échéant, des différences d'intensité des déformations du BT entre variétés. De telles différences peuvent être en partie vérifiées par l'observation de l'épaisseur des parois des fibres de BT. Celles-ci n'ont pas été quantifiées dans le présent travail, mais les observations microscopiques (optique et électronique) réalisées n'ont pas montré l'évidence d'une différence variétale à ce niveau. D'autre part, l'intensité des déformations de maturation du BT est susceptible de varier au sein d'un axe, et au sein d'une section. Ces différences, si elles existent, ne peuvent pas être révélées par la seule quantification des surfaces de BT. De plus, même en négligeant les variations de déformation de maturation entre fibres de BT, la quantification par la surface des zones présente ses limites. Les zones identifiées à partir de colorations ne sont pas exclusivement constituées de fibres de BT. La présence plus ou moins importante d'autres types cellulaires (vaisseaux, parenchyme...) est susceptible de biaiser l'information. Par ailleurs, le BT n'est pas le seul tissu à présenter des déformations de maturation. Le bois normal peut aussi jouer un rôle plus ou moins important à cet égard. Pour certaines espèces de feuillus, le BT est absent, et ce sont des cellules de bois normal qui jouent son rôle (Wilson et Gartner 1996). Le bois normal est susceptible de présenter une importante variabilité de déformations de maturation, que notre démarche ne permet pas de détecter.

En outre, la méthode de détection elle-même présente ses limites. Nous avons constaté que la coloration au réactif de Hertzberg (chloro-iodure de zinc) ne permettait pas toujours de colorer spécifiquement les zones de BT chez les axes de 'Modesto'. La même coloration a été utilisée par Dumonceau sur des axes de la même variété et du même âge. Cet auteur a eu un peu plus de succès dans l'utilisation du colorant, mais il observe une certaine variabilité des colorations obtenues. Il fait notamment remarquer que « chez Modesto, le contraste entre le bois de tension et le bois normal est moins net, et la coloration est plus fugace » (Dumonceau 1995). La méthode macroscopique que nous avons utilisée pour une partie de l'échantillon est basée sur une observation directe de rondelles sèches poncées. Nous avons noté, et validé par confrontation à des colorations microscopiques appariées, que les zones sombres qui apparaissent sur ces rondelles sont bien des zones de BT. On ne peut pas pour autant affirmer que la réciproque est vraie. Il n'est pas impossible que certaines zones de BT, selon leur surface et leur position dans le cerne, ne soient pas détectées par cette méthode. Cependant, la bonne concordance entre les résultats obtenus avec cette méthode d'observation et les résultats obtenus à partir de la coloration bleu astra / safranine montre que ce biais, s'il existe, est faible. La coloration bleu astra / safranine est bien éprouvée en tant que révélateur du BT et validée sur l'abricotier.

Sur d'autres espèces, les choses ne sont pas si simples, et les méthodes de colorations habituelles ne permettent pas de mettre en évidence des plages de cellules qui présentent par ailleurs tous les caractères (anatomiques et mécaniques) du BT. D'autres techniques peuvent être utilisées dans ce cas. L'observation microscopique de l'épaisseur des parois, et la mesure de l'angle des microfibrilles peuvent être utilisés pour caractériser le BT (Baillères et al. 1995). D'autre part, les cellules de BT sont beaucoup plus riches en cellulose que les autres cellules et pratiquement exemptes de lignines. Le dosage de ces substances peut être utilisé comme indicateur quantitatif. Ces diverses techniques ont été utilisées avec succès pour la comparaison du bois de pêcheurs pleureurs et dressés, qui ne se colorait pas nettement avec les colorants habituels (Nakamura et Tsushima 1997).

4.2. Distribution et rôle du bois de tension

Chez les espèces produisant du bois de tension, celui-ci est habituellement présent en quantité variable dans les axes inclinés. On en trouve aussi fréquemment dans des axes verticaux (Wilson et Archer

1977). Il est généralement distribué de façon asymétrique au sein des cernes, et situé préférentiellement du côté supérieur de l'axe. Il est caractérisé par un retrait à maturation bien supérieur à celui du bois « opposé » (Wilson et Archer 1977; Archer 1986). La dissymétrie de retraits entre face supérieure et face inférieure de l'axe implique un redressement de celui-ci. Par ce processus, le bois de tension est un moteur des réorientations actives au sein de l'axe, et on lui attribue un rôle de régulation de la forme et de l'orientation (Wilson et Archer 1977; Fisher et Stevenson 1981; Fisher 1985).

➤ **Interprétation des différences variétales**

Les pourcentages de BT que nous avons trouvés chez les différentes variétés sont surprenants, et contraires à l'idée qu'on pouvait s'en faire compte tenu de la bibliographie. En effet, dans nos échantillons, 'Lambertin' qui est nettement la variété la plus dressée, est aussi celle qui comporte le moins de BT. Ces résultats sont opposés à plusieurs observations, notamment les comparaisons sur pêcher et cerisier du Japon ornementaux entre des types pleureurs et dressés. Chez ces espèces, le BT est plus abondant dans les types dressés que dans les cultivars pleureurs (Nakamura et al. 1994; Baba et al. 1995; Nakamura et al. 1995; Yoshida et al. 1999; Nakamura, Tsushima et Nakagawa 2000).

De même, les différences variétales entre 'Lambertin' et 'Modesto' sont inversées entre nos résultats et ceux de Dumonceau (1995). Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences. Dumonceau a utilisé la méthode de coloration macroscopique au chloro-iodure de zinc, et nous avons utilisé la coloration bleu astra / safranine sur coupes microscopiques. Il est possible que la concordance entre les colorations soit inégale entre variétés. D'autre part, les charpentières étudiées étaient plus âgées et appariées sur leur inclinaison (une verticale, une oblique et une horizontale pour chaque variété), alors que les axes que nous avons étudiés ont été échantillonnés à l'âge de un an, et analysés à la fin de leur seconde année de croissance. Les axes de 'Lambertin' étaient nettement plus dressés que ceux de 'Modesto' au moment de leur prélèvement. Cette différence d'inclinaison a pu impliquer une différence d'intensité dans la réaction, qui expliquerait pourquoi le BT est plus abondant dans les axes de Dumonceau. Les différences d'âge peuvent aussi avoir des conséquences similaires : 'Lambertin' porte peu de fruits pendant sa seconde année de croissance (c'est-à-dire sa première année de mise à fruits), mais porte de nombreux fruits sur les rameaux courts, qui ne mettent à fruits que les années d'après. Les charpentières de cette variété sont donc susceptibles d'être plus stimulées par la charge en fruits que les axes en seconde année de croissance.

Plus généralement, l'analyse biomécanique a montré que, pour les axes que nous avons étudiés, le BT n'est pas le principal facteur qui conditionne leur orientation finale, bien qu'il participe effectivement au mécanisme de redressement chez l'abricotier. Nous n'avons pas noté d'indice d'une flexion active des axes *via* le BT, comme cela a été observé par ailleurs sur Marronnier d'Inde (Jaccard 1919) et sur diverses espèces de feuillus (Fisher et Stevenson 1981). La flexion passive, conditionnée par l'élançement et le chargement, est le phénomène prépondérant. Compte tenu de l'envergure de ce phénomène, le BT semble plus compenser partiellement la flexion que créer un réel redressement. Par ailleurs, dans le cas où la flexion est trop importante (cas de 'Modesto' et 'Palsteyn'), il ne semble pas constituer un mécanisme suffisamment efficace de régulation de la forme, dans le sens où il ne parvient pas totalement à compenser la flexion.

Nous proposons donc d'interpréter le fait qu'on ait observé une tendance inverse (moins de BT sur les cultivars dressés) en considérant le BT non pas comme une cause du redressement, mais comme une conséquence de la flexion. Les cultivars qui fléchissent le plus sous l'effet des charges seraient plus stimulés, et donc produiraient une quantité plus importante de BT. Les résultats obtenus à partir des axes arqués sur 'Modesto' appuient également cette idée. En effet, dans le cerne mis en place l'année

du traitement, le pourcentage moyen de BT a été évalué à 10% de plus pour les axes arqués que pour les témoins (rappelons que les témoins ont été privés de leurs fruits, et sont restés dressés toute l'année). Or, ces axes ont ensuite été maintenus arqués et le BT ne pouvait donc pas avoir dans ce cas une action de redressement. Enfin, pendant le suivi 1999, les axes de 'Modesto' ont été laissés en port libre et portaient des fruits. Ils ont subi une arcure comparable à celle imposée aux axes de 95 ont produit un taux de BT analogue.

4.3. Recherche d'une loi de réorientation

Le fait que le BT se forme préférentiellement sur la face supérieure des axes arqués ou inclinés est bien connu depuis longtemps (Jaccard 1919). De nombreux auteurs ont cherché à identifier le stimulus responsable de la différenciation de ce tissu (Wilson et Archer 1977). Deux hypothèses dominent dans la littérature. Certains auteurs ont affirmé que les contraintes (ou les déformations) locales au niveau du cambium sont responsable de cette différenciation. Pourtant, les observations faites sur les axes soutenus pendant leur développement (Fournier et al. 1994; Yoshida et al. 2000) fournissent des arguments pour négliger le facteur. Pour d'autres auteurs, c'est l'inclinaison de l'axe dans le champ de pesanteur qui détermine sa réaction. A ce jour, aucune des deux hypothèses n'est l'objet d'un consensus, et on s'accorde pour dire que les observations ne peuvent être expliquées par un seul des deux stimuli proposés (Wilson et Archer 1977; Fisher 1985). L'explication la plus synthétique proposée consiste à dire que, quand une tige est écartée de sa position d'équilibre, le bois de tension apparaît de façon à induire des réorientations qui tendent à restituer sa position initiale (Wilson et Archer 1977).

4.3.1. Recherche d'un facteur de différenciation du BT

Nous nous sommes intéressés à cette question (chapitre IV-4) afin de déterminer si les différences de pourcentages de BT observés entre variétés étaient imputables à des différences variétales d'aptitude à la réaction ou si elles découlaient indirectement de différences d'intensité du stimulus entre variétés. Dans ce but, nous avons cherché des corrélations, sur l'ensemble des axes, entre la quantité de bois de tension et différentes covariables.

➤ Choix des facteurs envisagés

Les variables mécaniques (contrainte et déformations locales) n'ont pas été intégrées à cette recherche pour plusieurs raisons. Tout d'abord, contrairement aux variables utilisées dans l'analyse, celles-ci n'ont pas été mesurées directement sur notre échantillon. La mesure de l'état de contrainte/déformation dans les axes est destructive, et n'a pas donc pu être pratiquée dans le cadre d'un suivi de croissance. L'estimation indirecte de ces paramètres fait intervenir le calcul de courbure locale. Ce calcul est sensible à de petites variations des coordonnées des points, à moins d'être pratiqué sur la base d'un grand nombre de points (Mouliia 1993). Compte tenu du pas de discrétisation de nos mesures, il n'était pas possible de réaliser le calcul sur un voisinage de plus de 5 points. Les quelques essais réalisés ont montré qu'avec notre incertitude de mesure, ce calcul ne pouvait pas donner une estimation fiable des différences de courbure entre deux dates. Enfin, l'observation préalable de la distribution du BT dans les axes de l'essai d'arcure a montré que ce stimulus ne pouvait expliquer la distribution de BT observée. En effet, ces axes ont été arqués en attachant un poids aux deux tiers de la longueur. Le tiers distal de l'axe n'est donc soumis à aucune contrainte due au traitement²⁵. Il est par

²⁵ les contraintes dues au poids propre sont, dans la partie terminale de l'axe, très faible et de très loin inférieures aux contraintes imposées par le traitement.

contre soumis à une importante variation d'inclinaison. Les segments de cette partie des axes comportant du BT en abondance, nous avons jugé que le facteur mécanique ne pouvait être seul responsable de la différenciation de BT. Nos observations vont donc plutôt dans le sens de celles faites sur les axes soutenus pendant leur développement par Fournier et al. (1994) et Yoshida et al. (2000).

➤ **Analyse des corrélations**

Par contre, parmi les descripteurs de croissance et flexion des axes (état et variations de la géométrie, de la morphologie et du chargement), nous avons trouvé des corrélations significatives avec le pourcentage moyen de BT. Les corrélations entre ces variables et les descripteurs du BT ont été calculés à deux échelles. Le premier calcul a été réalisé à l'échelle de l'axe. Les descripteurs des axes ont été corrélés au pourcentage moyen de BT dans le cerne 99 (%BT99). Le second calcul a été réalisé à l'échelle du segment à partir de descripteurs locaux et du %BT99 de chaque section. Dans les deux cas, la variable la mieux corrélée au %BT99 est la variation d'inclinaison sur toute la saison. La corrélation obtenue est cependant assez faible, et le facteur inclinaison n'explique qu'un quart de la variation observée. La prise en compte conjointe de plusieurs variables explicatives a été testée par des modèles de régression multiple (non présentés dans ce document), sans apporter d'amélioration convaincante. Seul la prise en compte d'un effet « variété » améliore la prédiction du %BT99 : toutes choses égales par ailleurs, 'Lambertin' produit moins de BT que les autres variétés. Une différence variétale de réaction a donc été mise en évidence.

La faiblesse de l'échantillon sur laquelle se base ce travail (15 axes par variété) doit cependant être à nouveau soulignée. Un échantillon supérieur aurait peut-être permis de détecter plus finement l'action de différents facteurs, et aurait sans doute permis d'envisager la recherche de facteurs de différenciation par variété. L'autre échantillon analysé est constitué des axes de 'Modesto' à arcure imposée, sur lequel une démarche analogue de recherche de corrélations à l'échelle de l'axe a été réalisée. Rappelons que ces axes étaient tous très érigés avant l'arcure (c'est en général le cas pour les axes d'un an de cette variété), et ont été arqués à l'aide de masses imposées. Ils présentaient donc une grande variabilité dans leur inclinaison après arcure. Les meilleures corrélations ont été trouvées avec deux descripteurs : l'inclinaison après arcure et la variation d'inclinaison pendant l'arcure. Compte tenu de l'homogénéité des inclinaisons avant arcure, ces deux descripteurs sont pratiquement équivalents. La variation d'inclinaison, qui est aussi celui qui était la mieux corrélée dans le cas des axes du suivi 99 apparaît donc comme une cause privilégiée de la différenciation du BT.

➤ **Intérêt et limites de la méthode d'analyse mise en œuvre**

Dans les travaux qui s'attachent à comprendre les mécanismes qui président à l'apparition du BT, deux méthodes sont principalement utilisées. La première méthode est basée sur la mise en relation de la forme d'axes en port libre et la distribution du BT dans ces axes (Fisher et Stevenson 1981). L'analyse *a posteriori* qu'elle implique n'est pas sans danger, et peut mener à d'importantes difficultés d'interprétation. Par exemple, la présence de BT du côté inférieur d'un axe oblique ou horizontal n'est pas nécessairement l'indice d'une flexion active : l'axe a très bien pu être dans une position différente à une époque antérieure de son développement. De même, l'abondance de BT dans un axe pratiquement vertical ne signifie pas nécessairement que cet axe est très réactif à de petites variations d'inclinaison : il est très possible que l'axe ait été antérieurement fortement incliné, et que la quantité de BT et la position verticale soient tous deux le résultat d'une réaction forte à cette époque. Réciproquement, un faible taux de BT dans un axe arqué n'est pas le signe d'une faible réactivité de l'axe, si l'arcure s'est faite récemment... La limite de cette approche réside dans le fait qu'on compare

un état actuel (la forme de l'axe) et une situation résultant de toute l'histoire de l'axe (la distribution du BT).

La seconde méthode se base sur une approche expérimentale. Des axes ligneux sont soumis à divers traitements imposés : inclinaison, arcure, mise en boucles, etc. Le stimulus imposé à l'axe est maîtrisé, et peut être mis en relation avec sa réaction. C'est cette méthode qui a été mise en œuvre lors de l'essai d'arcure sur 'Modesto'.

La méthode mise en œuvre sur les axes que nous avons suivis en 1999 se rapproche de la première : nous avons réalisé une analyse *a posteriori* sur des axes en port libre. L'originalité du travail réside dans le fait que les variations de forme ont été mesurées tout au long de la saison, et que l'histoire des axes, bien que non entièrement maîtrisée, est connue. Nous avons ainsi pu mettre en relation la quantité totale de BT et le stimulus. L'un des intérêts de cette démarche est qu'elle repose sur l'analyse d'un phénomène naturel, et non d'un traitement imposé. On ne s'expose donc pas au risque d'analyser un comportement « pathologique », et on se limite à l'interprétation de comportements qui existent en conditions naturelles. La contrepartie est que l'interprétation des résultats est moins claire. La relation que nous avons trouvée entre variation d'inclinaison et quantité de BT est beaucoup plus faible dans le cas des axes en port libre (25% de la variance expliquée) que dans le cas de l'essai d'arcure imposée (50% de la variance expliquée).

L'une des raisons est que, dans le cas d'axes en port libre, le stimulus n'est pas constant au cours du temps. Considérons le cas d'un axe qui a subi une forte variation d'inclinaison en cours d'année, puis s'est fortement redressé. Cet axe contiendra une forte quantité de BT, sans pour autant présenter une forte variation d'inclinaison sur la saison. La diversité et la complexité des situations de ce type est susceptible d'expliquer pourquoi les corrélations détectées sont faibles. Ce point souligne une limite de la démarche pour laquelle nous avons opté. Le choix de se baser sur des pourcentages de BT dans l'ensemble du cerne ne permet pas une analyse suffisamment fine pour tenir compte de l'importance des réorientations intra-annuelles que nous avons observées. La distribution du BT est hétérogène dans un cerne. L'hétérogénéité circonférencielle, nous l'avons montré, ne constitue pas un problème majeur, car le BT est le plus souvent localisé dans le haut des coupes. Par contre, l'hétérogénéité radiale est importante : les bandes de BT sont situées à différents niveaux dans le cerne. Ces bandes correspondent à différentes périodes de fonctionnement du cambium. Nous avons tenté une analyse qualitative de cette distribution radiale sur quelques axes, sans grand succès. Une analyse quantitative est envisageable et serait susceptible de fournir une information riche, en mettant en relation la dynamique des descripteurs de forme et la dynamique de mise en place du BT. Pour cela, il faut être capable de reconstituer cette dynamique, en se basant sur les données d'anatomie et de croissance radiale. Cette reconstitution pose des problèmes pratiques (prise en compte de l'épaisseur de l'écorce, quantification par analyse d'image) qui n'ont pas permis de l'envisager au cours de cette thèse.

➤ **Notion d'inclinaison de consigne**

La notion d'inclinaison de consigne a été suggérée par plusieurs auteurs pour rendre compte des observations sur la distribution du bois de réaction dans les axes obliques et horizontaux (Wilson et Archer 1977; Fisher 1985; Yoshida et al. 2000). Elle permet d'expliquer pourquoi aucun BT ne se forme dans certaines branches dont la direction n'est pas verticale, tout en conservant l'hypothèse d'un stimulus gravitationnel. Sous cette hypothèse, le BT se forme dans les branches quand elles s'écartent d'une hypothétique inclinaison de consigne, correspondant à leur état d'équilibre. Nos résultats sur l'analyse de corrélations tendent à confirmer cette hypothèse. Le %BT99 est bien mieux corrélé à la variation d'inclinaison sur la saison qu'à l'inclinaison elle-même (quelle que soit la date à laquelle on la mesure). Si on considère que la consigne est fixée à l'inclinaison en début de saison, nos résultats

montrent que l'axe réagit d'autant plus qu'il s'éloigne de cette inclinaison. Cette hypothèse a été confirmée par les simulations réalisées.

Robards (1965) a montré que, sur des boutures de saule, la quantité de BT formée était proportionnelle au sinus de leur angle par rapport à la verticale. Il a ultérieurement proposé une loi plus élaborée pour rendre compte de ses observations, la loi « sinus modifiée » (Robards 1966). Cette hypothèse suppose une réponse non linéaire à une consigne verticale. Nous l'avons testée en calculant la corrélation entre le %BT99 et le cosinus de l'inclinaison en fin de saison (qui correspond au sinus de l'angle par rapport à la verticale). Cette corrélation est faible. Par contre, la corrélation entre le %BT99 et le cosinus de la variation d'inclinaison sur la saison est bonne ($R=0.57$). La corrélation est meilleure qu'avec la variation d'inclinaison. Ce résultat suggère une réponse non linéaire à une consigne non verticale. Nous ne nous avancerons pas plus dans l'interprétation de ce résultat.

4.3.2. Simulation de lois de réorientations

La simulation de la régulation de la forme par une loi de réorientation a été réalisée la première fois sur pin maritime (Fournier et Chanson 1992; Fournier et al. 1994). Dans ce travail, les auteurs ont simulé le redressement d'un jeune arbre artificiellement incliné. La formulation mécanique présentée dans ce mémoire est analogue à celle qu'ils ont mise en œuvre. Ces auteurs ont proposé différentes lois de réorientation : intensité constante, proportionnelle à l'inclinaison ou à la vitesse d'inclinaison, ou combinaison des deux. Par ailleurs, leur modèle a été testé avec l'hypothèse la plus simple (intensité constante) et confronté aux observations mesurées sur un individu. L'adéquation entre le modèle et la réalité est appréciée visuellement. Moyennant un choix adéquat des paramètres mécaniques, le modèle mime la réalité de façon satisfaisante. Certaines inadéquations locales sont cependant notées : le redressement est trop rapide dans la partie terminale de l'axe et trop lent dans sa partie basale (Fournier et al. 1994). Les auteurs soulignent la nécessité d'une loi de régulation plus complexe.

Les simulations que nous avons réalisées sur la période de redressement en fin de saison (V-1.2.2) procèdent d'une démarche strictement analogue. Les simulations avec une loi de réorientation constante ont donné des résultats satisfaisants au niveau de l'individu (la variation d'inclinaison moyenne est bien simulée). Elles présentaient par contre des insuffisances au niveau local : certaines parties se redressaient trop et d'autres pas assez, comme dans la simulation de Fournier et al. (1994). Les simulations réalisées avec une loi plus complexe (réaction proportionnelle à l'écart à l'inclinaison de consigne) ont montré une adéquation locale pratiquement parfaite (figures V-19,20,21). La recherche d'une loi encore plus complexe (dépendance à la vitesse d'inclinaison, aux déformations locales, combinaison de différents facteurs...) n'est pas apparue nécessaire.

Il faut noter cependant que ces résultats ont été obtenus après ajustement des paramètres biomécaniques pour chaque individu²⁶. Les paramètres menant à des simulations satisfaisantes ne sont pas les mêmes pour chaque individu. Les simulations qui ont été réalisées avec les mêmes paramètres de réorientation sur l'ensemble des individus (V-1.2.3) permettent une adéquation globalement satisfaisante sur l'ensemble des individus, mais pas nécessairement pour chaque individu.

Deux points ont été limitants dans la recherche d'une loi générale à tous les individus d'une même variété. La recherche de facteurs de différenciation du BT par variété permettrait tout d'abord d'avoir des indices plus précis sur les lois de réorientation spécifiques. Celle-ci n'a pas été réalisée car

²⁶ Les valeurs de différentiel de maturation ajustées sont le plus souvent très élevées, et sont à la limite supérieure des déformations de maturation habituellement relevées sur feuillus. Soulignons que les hypothèses du modèle (distribution plane des déformations, module homogène sur la couche) ne permettent pas d'interpréter directement cette valeur comme les déformations de maturation du bois de tension. Un module plus élevé dans le bois de tension que dans le bois normal peut notamment expliquer les valeurs obtenues par ajustement sous ces hypothèses.

l'échantillon d'axes par variété n'a pas été jugé suffisant. D'autre part, les performances numériques du modèle se sont avérées insuffisantes pour réaliser de façon automatique des ajustements sur plusieurs paramètres. Les ajustements, basés sur une simulation sur toute la saison, et sur plusieurs individus, ont été réalisés par ajustement interactif des valeurs en fonction de l'adéquation visuelle. Cette procédure est relativement longue, et ne permet pas d'essayer un grand nombre de lois différentes, ni d'obtenir les valeurs ajustées avec précision. L'implémentation sous un langage de programmation plus performant, et l'optimisation du programme constituent une solution qui a été explorée au cours de ce travail de thèse et dont les éléments essentiels sont fournis dans un rapport annexe.

4.3.3. Conclusions

➤ **Limites du concept d'inclinaison de consigne**

L'analyse des corrélations et les simulations numériques ont montré que l'inclinaison de consigne décrit bien les réorientations observées durant la saison de croissance. Cependant, d'autres éléments montrent les limites de ce concept.

L'observation des axes de 'Modesto' arqués début 1995 et prélevés début 1998 met en évidence ces limites. Le pourcentage de BT dans les différents cernes (IV-4.4.3) a montré clairement que la réaction des axes était limitée à l'année du traitement. Or, ces axes sont restés attachés en position arquée jusqu'à leur prélèvement. Sous l'hypothèse d'une inclinaison de consigne constante, on aurait dû observer une réaction qui perdure aux cours des années.

De plus, le fait que le bois de tension soit distribué en bandes (voir par exemple des figures IV-110,112,114) et non continu sur la largeur des cernes s'accorde difficilement avec le concept d'inclinaison de consigne : les arrêts et reprises de production de bois de tension ne correspondent pas à des phases successives de rapprochement et d'éloignement de cette inclinaison de consigne. Le bois de tension, tout comme la croissance radiale, n'a pas une activité continue dans l'année. La comparaison de son rythme d'activité avec celui de la croissance primaire, de la croissance secondaire, et de la dynamique de flexion serait probablement susceptible de fournir des éléments nouveaux de compréhension.

Enfin, il faut souligner que l'idée d'une position d'équilibre à laquelle aucun bois de tension n'est produit est assez paradoxale d'un point de vue biomécanique : un axe en croissance est nécessairement soumis à un accroissement pondéral qui tend à le faire fléchir. En l'absence de redressement actif, il ne peut se maintenir en équilibre (Fournier 1989). L'équilibre d'une branche dont l'inclinaison ne varie pas est dynamique, et implique nécessairement un processus actif de redressement. Sur l'abricotier, du BT a été détecté dans la quasi totalité des coupes analysées.

La présence de BT dans différentes espèces de feuillus a été mise en relation avec le modèle architectural (Fisher et Stevenson 1981). Dans certains modèles architecturaux, comme le modèle de Troll ou celui de Champagnat (auquel appartient l'abricotier), la flexion d'axes est partie intégrante de la mise en place de l'architecture (Hallé et al. 1978). L'hypothèse de l'existence d'une position d'équilibre des branches semble mal adaptée à la compréhension de la dynamique de mise en place de l'architecture de ces espèces.

➤ **La distribution du BT dépendrait-elle du statut hiérarchique de l'axe dans l'arbre ?**

Finalement, l'interprétation des résultats obtenus concernant la distribution du BT entre les axes, suggère une interprétation dynamique de l'inclinaison de consigne. Je propose de voir cette inclinaison de consigne non comme une position d'équilibre de l'axe ni comme sa position initiale, mais comme

la traduction d'un statut hiérarchique de l'axe au sein de l'arbre. Les axes de l'essai d'arcure étaient, au début de l'année, très verticaux et dans un statut "dominant". Sous l'effet de l'arcure, ils ont réagi fortement, pour tenter de maintenir ce statut, correspondant à une consigne verticale. Les années suivantes, après réorganisation des relations de dominance au sein de l'arbre, ces axes ont définitivement perdu ce statut dominant, ce qui se traduirait par une consigne moins verticale, et donc une réaction moins forte. De plus, l'interprétation proposée permettrait d'expliquer pourquoi, à inclinaison équivalente, 'Lambertin' réagit moins que les autres variétés. Les axes de cette variété ont des inclinaisons variées, mais dans l'ensemble ils sont beaucoup plus dressés que ceux des autres variétés. A inclinaison égale, un axe de 'Lambertin' est donc plus dominé par les autres axes de l'arbre que ne l'est un axe de 'Modesto' ou 'Palsteyn'. Il aurait alors, à inclinaison égale, une consigne moins verticale que les autres variétés.

Par ailleurs, on sait que le BT peut être généré en réponse à un traumatisme. Par exemple, chez certaines espèces ayant des axes à croissance verticale, quand le sommet de l'arbre est décapité, la branche sous-jacente se redresse spontanément pour prendre sa place (Wilson 1973). Ce type de situation est difficilement explicable par un stimulus mécanique, ou par un stimulus gravitationnel. Par contre, il pourrait s'expliquer en considérant une variation de statut hiérarchique et, par conséquent, d'inclinaison de consigne. Cette branche sub-terminale aurait, après élimination de l'apex, changé de statut dans l'arbre, ce qui lui conférerait une inclinaison de consigne verticale.

Un tronc incliné, quant à lui, conserve son statut dominant en l'absence de concurrent, et réagit fortement jusqu'à redressement complet. On peut se demander si, dans le cas d'un tronc arqué sur lequel se développe une réitération importante destinée à le remplacer, le tronc continue à réagir fortement ; une réponse négative apporterait un soutien au mécanisme proposé.

Cette proposition rejoint celle de Wilson, qui propose un contrôle apical des réorientations (Wilson 2000). Au travers de cette proposition, je voudrais suggérer qu'une conception plus intégrée de l'architecture et de la biomécanique, tenant compte de relations de hiérarchie au sein de l'arbre, pourrait permettre de mieux comprendre le déterminisme de l'apparition du bois de tension.

VI-5. Portée des résultats et perspectives

5.1. Portée des résultats

L'objectif de cette section est de replacer le travail effectué au cours de cette thèse dans un cadre plus large, tant au niveau du matériel étudié que du cadre conceptuel. Il s'agit d'énoncer les limites des résultats acquis, et de faire émerger les points à prendre en compte dans l'optique de dépasser ces limites.

5.1.1. Application de la démarche à d'autres génotypes

Les résultats obtenus ont mis en évidence la prépondérance de l'effet du rapport d'élanement des axes, et l'importance de la dynamique relative de croissance en diamètre et de chargement. Les propriétés matérielles et les réorientations actives sont apparues comme des facteurs secondaires, dont la variabilité ne pouvait expliquer les différences de port. Ces résultats ont été obtenus sur trois variétés d'abricotier, dont les ports illustrent la diversité architecturale de cette espèce, d'un port très dressé à un port retombant. Le modèle a été validé sur des individus de morphologie variée, provenant des trois variétés.

Les résultats tendent donc à un caractère relativement général au sein de l'espèce. On ne peut cependant exclure que la variabilité observée chez les variétés choisies soit élargie par la prise en compte de nouvelles variétés. Pour caractériser d'autres variétés d'abricotier, on peut se contenter de mesures plus légères et de traitements plus simples que ceux pratiqués pendant cette thèse. Des mesures globales (à l'échelle de l'axe) à quelques dates clés de l'année semblent être suffisantes : diamètre et longueur en début de saison, charge en fruits et diamètre à la récolte, diamètre en fin de saison, masse des pousses pour chaque unité de croissance, module d'élasticité et pourcentage de bois de tension. Les descripteurs synthétiques présentés au chapitre V-2 peuvent alors être calculés et servir de base à la comparaison des variétés.

Le passage à une autre espèce nécessite, par contre, une analyse plus poussée. Les différentes périodes-clés identifiées chez l'abricotier ne sont pas nécessairement identiques pour une autre espèce. Chez le pommier, par exemple, la typologie des organes végétatifs est différente et les fruits restent présents beaucoup plus longtemps sur l'arbre. Les périodes de développement du fruit sont aussi différentes, et les rythmes de croissance ont probablement leurs propres spécificités. Il semble alors indiqué de procéder à un suivi de croissance et de flexion analogue à celui présenté dans ce mémoire. Le suivi de flexion permet d'identifier les différentes phases de flexion et de redressement. Le suivi de croissance permet de repérer les phénomènes biomécaniques associés à chacune de ces phases. L'identification des périodes auxquelles se manifestent les différences d'intensité de la flexion permet alors de mettre en évidence les phénomènes biomécaniques prépondérants.

L'outil de modélisation présenté dans ce mémoire peut être utilisé pour évaluer les propriétés mécaniques en plein champ. Il permet aussi de tester différentes hypothèses par la démarche d'évaluation présentée à la partie V, guidant le choix d'un modèle. Certaines hypothèses structurelles du modèle peuvent être limitantes pour d'application à une autre espèce, telles que le fait de travailler sur une structure de longueur fixe ou de négliger l'effet des pousses longues. Le développement d'un outil plus général serait avantageux à cet égard.

5.1.2. Limites d'une étude basée sur des axes d'un an

La démarche biomécanique mise en œuvre s'est focalisée sur l'analyse de l'évolution de la forme d'axes d'un an en croissance. Elle a donné lieu à une caractérisation précise de ce matériel : la morphologie et la dynamique de croissance primaire et secondaire, de mise à fruit et de flexion, ainsi que les propriétés mécaniques et anatomiques ont été quantifiées. A partir de ces données, les facteurs responsables des différences d'intensité de la flexion et du redressement ont été identifiés.

De façon implicite, nous avons assimilé le port des variétés à l'orientation et à la forme de la catégorie d'axes étudiés. Ce choix se justifie par le fait que ces axes, encore très élancés et pour la première fois soumis au poids des fruits, subissent des réorientations de grande ampleur. Celles-ci sont ultérieurement figées par la croissance en diamètre. Les années suivantes, les axes sont plus rigides, et les réorientations moins intenses. Les réorientations qui ont lieu pendant cette première année ont donc une importance particulière. Des simulations ont par ailleurs montré l'importance prépondérante des événements qui ont lieu dans les étapes précoces du développement d'un axe (Fournier et Moulia 1992; Fournier et al. 1994). Cette étape est donc apparue comme une phase clé, et a constitué la période privilégiée pour une première étude biomécanique de la mise en place du port.

Les modes de conduite récemment mis au point pour mettre à profit l'arcure (Jay et al. 1995c; Lespinasse 1996) se basent sur la maîtrise et le renouvellement de branches fruitières dont le cycle de vie est de plusieurs années. D'autre part, la forme des axes les plus âgés de l'arbre (tronc, charpentières, sous-mères) en déterminent partiellement le port. On sait que le port d'un arbre peut évoluer en fonction de son âge (Laurens et al. 1998). Il est donc important de se poser la question du transfert des résultats vers des structures plus âgées.

La première conséquence est un changement d'échelle : les structures âgées sont plus longues et de plus gros diamètre. Il est clair que les formules de mécanique en elles-mêmes ne sont pas affectées par ce changement d'échelle. Leur application peut par contre amener à des conclusions différentes. Une analyse dimensionnelle de ces formules permet de donner une première idée de l'effet d'échelle. Nous avons établi au II-1.3.3 une formule donnant, sous des hypothèses très simples, la courbure totale d'un axe sous charge. Si la charge est proportionnelle au volume de l'axe, la courbure totale est proportionnelle à L^3/D^2 (où L est la longueur et D le diamètre). Si l'axe croît de manière proportionnelle, la charge reste proportionnelle au volume et l'élancement L/D reste constant au cours de son développement. On peut alors prévoir que courbure totale aura tendance à augmenter avec la longueur de l'axe. Ce raisonnement trouve cependant vite ses limites dans les hypothèses de proportionnalité sur lesquels il repose. Une branche ne croît pas en général de manière proportionnelle, et les variations de proportions ne sont pas nécessairement identiques entre variétés. Par exemple, on sait que la variété 'Lambertin' fructifie essentiellement sur rameaux courts et peu sur rameaux longs. C'est la raison pour laquelle, en étudiant des axes d'un an, nous avons noté que c'est la variété qui porte la charge la plus faible. Les choses peuvent être très différentes la seconde année : les nombreux rameaux courts de cette variété vont mettre à fruits, et il n'est pas du tout certain qu'elle reste alors la variété la moins chargée. La nature des phénomènes prépondérants peut donc changer avec l'échelle.

Par ailleurs, le passage à des structures plus âgées ne consiste pas seulement en un changement d'échelle du problème. Des points nouveaux doivent être pris en compte, qui n'ont pas nécessairement la même importance chez toutes les variétés. Nous avons évoqué le fait que les effets visco-élastiques tendent à s'accroître à mesure que le temps passe. Il n'est pas impossible qu'à terme, ils participent de manière significative aux différences observées entre les variétés. D'autre part, la nature de la structure change. Celle-ci pouvait être décrite de manière linéaire dans le cas d'un axe d'un an. Sur une structure plus âgée, il peut devenir difficile de se contenter d'une représentation linéaire. Le nombre et

l'importance des ramifications peuvent rendre nécessaire la prise en compte de la nature arborescente de la structure. Le cadre de modélisation que nous avons défini devient alors insuffisant. Les modèles développés par l'AMAP constituent un cadre plus adapté.

5.1.3. Intégration dans un cadre d'étude plus large

L'analyse du port réalisée au cours de cette thèse se focalise sur le phénomène de l'arcure, en adoptant un point de vue biomécanique. Nous avons noté à plusieurs reprises que la compréhension des phénomènes en jeu touchait à d'autres disciplines. Le rôle des rythmes de croissance et de la phénologie invitent à intégrer des connaissances relevant de la physiologie. Les lois d'apparition du bois de tension sont difficiles à comprendre sans se placer dans une prise en compte plus globale de l'architecture, et des relations hiérarchiques au sein de l'arbre.

Trois phénomènes peuvent être mis en jeu en réponse à l'inclinaison d'un axe (Wilson 1997) : la réorientation de cet axe par le jeu des déformations de maturation ; la réorientation « primaire », qui consiste en un changement de la direction de croissance au niveau de l'apex ; et le remplacement de l'axe par la croissance vigoureuse de l'un de ses axillaires. Parmi ces trois phénomènes, seul le premier a été étudié et modélisé dans le présent travail.

Il est probable que le second phénomène joue un rôle chez l'abricotier. Nous avons observé que les axes de 'Modesto' sont fréquemment courbés vers le haut dans leur partie basale, et sensiblement verticaux dans leur partie distale. Inversement, les axes de 'Palsteyn' sont fréquemment courbés vers le bas. Ces faits ont été attribués à la mécanique de flexion et au rôle du bois de tension lors de la première année de croissance, mais ils sont peut-être aussi l'indice d'un redressement primaire plus ou moins efficace. Cette hypothèse est appuyée par le fait qu'on trouve fréquemment chez 'Palsteyn' des axes qui pointent vers le sol sans être courbés.

Le troisième phénomène, c'est à dire le remplacement de l'axe par le développement d'un axillaire (qu'il s'agisse d'un axillaire déjà en place ou du démarrage d'un bourgeon latent), revêt une importance particulière en arboriculture fruitière, du fait qu'il affecte directement les unités de production. Il fait appel à la notion de réitération (Oldeman 1974). La réaction à l'arcure en terme de ramification est désignée par le terme de gravimorphisme (Wareing et Nasr 1961). Elle a été abondamment étudiée (Wareing et Nasr 1961; Smith et Wareing 1964; Lakhoua et al. 1975...). Les études les plus récentes ont montré que le démarrage vigoureux d'un « gourmand », c'est à dire d'une réitération, pouvait annuler les bénéfices de l'arcure en terme de mise à fruits (Lauri et Lespinasse 2001).

La prise en compte de ce phénomène et de son interaction avec la mécanique de l'arbre semble donc être une voie particulièrement intéressante pour aboutir à une meilleure compréhension globale de la mise en place de l'architecture et du port.

5.2. Perspectives d'application en arboriculture fruitière

L'analyse biomécanique a permis de relier la forme des axes ligneux aux paramètres du développement. Les concepts mis en œuvre et les résultats obtenus devraient pouvoir être appliqués à terme dans le domaine des modes de conduite et, surtout, dans celui de l'amélioration variétale.

L'arcure imposée est une pratique courante en arboriculture. Les méthodes d'arcure pourraient être raisonnées en tenant compte de concepts biomécaniques. Il s'agirait, par exemple, de dimensionner les poids imposés ou de choisir les points d'attache en fonction de la forme désirée. Par ailleurs, les branches réagissent à l'arcure par la production de bois de tension. Son effet premier est de s'opposer à

l'arcure. La prise en compte des stratégies de réorientations propres aux géotypes permet de raisonner la méthode d'arcure de manière à la pérenniser, et à minimiser ainsi les interventions ultérieures. En outre, la présence de bois de tension a une incidence sur la physiologie de la branche, notamment en freinant la conduction (Spicer et Gartner 1998). Une méthode d'arcure minimisant la production de bois de tension est donc susceptible d'avoir des conséquences sur la physiologie de la branche, et indirectement sur la production fruitière. D'autre part, la position des fruits conditionne de façon importante la flexion des branches. La prise en compte de la biomécanique pourrait permettre de raisonner les méthodes d'éclaircissage, en prenant en compte les conséquences sur l'évolution des structures de production.

Les modes de production actuels s'orientent vers la recherche de variétés qui expriment naturellement l'arcure. La biomécanique peut, dans ce contexte, orienter les stratégies d'amélioration variétale. Deux voies sont aujourd'hui possibles pour l'amélioration génétique des variétés : la sélection variétale et (au moins à titre expérimental) la transformation génétique.

La sélection variétale se base sur l'exploitation, par croisements, de la diversité existante au sein de l'espèce. La comparaison du comportement biomécanique de différentes variétés permet d'identifier les caractères particuliers dont la variabilité explique la variabilité des ports observés. Une sélection orientée sur ces caractères permet alors d'escompter un effet sur le port des variétés produites. D'autre part, l'un des handicaps de la sélection dans le domaine des arbres fruitiers est la longueur des cycles de sélections : un caractère tel que le port ne peut être noté qu'après plusieurs années. D'autres caractères, tels que l'élancement des axes, peuvent être observés plus tôt et constituer des prédicteurs précoces du port. La sélection assistée par marqueurs et la détection de QTL (*Quantitative Trait Loci*) de ces caractères morphologiques (Bradshaw et Stettler 1995; Lawson, Hemmat et Weeden 1995; Kaya, Sewell et Neale 1999) permettent de cibler plus directement ces caractères, et d'accélérer la sélection.

La transformation génétique permet de créer une nouvelle diversité, ou d'introduire des caractères qui ne sont pas présents dans l'espèce. La biomécanique peut alors servir à déterminer les caractères à cibler, ou à prédire l'effet de l'introduction du caractère nouveau. Ces caractères ne sont pas nécessairement ceux qui expliquent la variabilité observée dans l'espèce. Clairement, une étude du type de celle qui a été présentée dans ce mémoire, basée sur la variabilité existante, ne permet pas de prédire quels sont les caractères pertinents à modifier par voie de transformation génétique. Le module d'élasticité et le bois de tension peuvent donc constituer, dans ce cadre, des caractère-cibles intéressants.

Les travaux récents sur la manipulation du port par des régulateurs de croissance (Nakamura et al. 1995; Kobayashi et al. 1996; Nakamura et Tsushima 1997; Nakamura et al. 2000) peuvent constituer des voies intéressantes à cet égard, en créant un lien direct entre le port et la physiologie. Ces travaux montrent, sur des pêchers et des cerisiers du Japon, que l'ajout de gibbérellines transforme un type pleureur en un type dressé (Nakamura et al. 1995; Nakamura et Tsushima 1997), et que l'ajout de brassinostéroïdes transforme un type initialement dressé en un type pleureur (Nakamura et al. 2000). Ces substances semblent avoir un effet direct sur l'activité cambiale et la production de bois de tension. L'identification et la manipulation des gènes codant pour ces substances pourrait alors être envisagée pour modifier le port des variétés.

Enfin, des recherches récentes dans le domaine forestier ont fait avancer les connaissances sur le contrôle génétique de la maturation du xylème (Allona et al. 1998; Hertzberg et Olsson 1998) et le métabolisme des lignines (Plomion et al. 2000). Le contrôle de ces caractères permet d'envisager de

manipuler directement le module d'élasticité du bois, et donc d'accélérer les phénomènes de flexion naturelle chez les fruitiers.

Conclusion générale

Ce travail a permis d'acquérir un certain nombre de résultats concernant la modélisation biomécanique des arbres fruitiers. Ces résultats sont d'ordre méthodologique autant que biologique.

La modélisation biomécanique des axes en croissance n'avait jamais été appliquée à des axes de petit diamètre, ni à un matériel provenant d'espèces fruitières. Cette application a été réalisée pour la première fois au cours de ma thèse. Elle a fait émerger différentes spécificités de ce matériel, qui n'avaient pas été envisagées dans les autres cadres d'application de la biomécanique. J'ai été amené à remettre en cause un certain nombre de points méthodologiques afin de prendre en compte ces spécificités. L'estimation des déformations de maturation par relaxation des contraintes à la périphérie des tiges, telle qu'elle est pratiquée usuellement, n'est pas directement applicable au matériel que nous avons étudié. De plus, l'hypothèse des petits déplacements s'est révélée inadaptée dans ce cadre d'étude.

*Par ailleurs, cette thèse m'a amené à développer des outils et des méthodes de mesure. La première de ces méthodes est l'estimation du module d'élasticité de structure *in vivo*, qui avait déjà été réalisée dans d'autres contextes, et qu'il a fallu adapter aux spécificités de notre matériel. Un second exemple est l'estimation des propriétés visco-élastiques *in vivo*, qui n'avaient à ma connaissance jamais été réalisées. Les estimations sont réalisées grâce à un outil informatique aisément réutilisable. Ce même outil a été utilisé pour simuler la flexion d'axe en croissance. La démarche de validation entreprise dans ce contexte a permis de discriminer objectivement le choix des hypothèses du modèle mécanique. Le modèle est capable de rendre compte de la flexion de façon satisfaisante, mais présente des limites qui ont été identifiées.*

Sur le plan biologique, les mesures ont permis de caractériser de façon précise et quantitative la croissance et la flexion sur le matériel étudié. L'analyse des résultats a amené à identifier les facteurs responsables des différences de port entre les variétés observées. Des éléments ont été fournis pour étendre la démarche à d'autres génotypes. D'un point de vue plus général, des résultats originaux ont émergé de l'analyse de la dynamique de croissance et de l'étude anatomique.

Les dynamiques de croissance primaire et secondaire mesurées ont montré que ces deux phénomènes ne sont pas synchrones pendant la saison végétative. Les conséquences de ce fait du point de vue biomécanique a été soulignée. Ses implications physiologiques restent par contre une question ouverte, et susceptible de remettre en cause certaines conceptions admises à ce sujet. Enfin, l'étude de la régulation de la forme des axes par la production de bois de tension a été entreprise sous plusieurs angles. Les résultats obtenus ont permis de conforter une hypothèse sur le déterminisme de l'apparition du bois de tension, et de proposer une vision synthétique de la régulation de la forme intégrant la position architecturale des axes.

Bibliographie

- Adam B, Sinoquet H, Godin C, Dones N (2000) 3A version 1.0: Un logiciel pour l'Acquisition de l'Architecture des Arbres intégrant la saisie simultanée de la topologie au format AMAPmod et de la géométrie par digitalisation 3D. Guide de l'utilisateur, INRA-PIAF, Clermont-Ferrand (France)
- Allona et al. (1998) Analysis of xylem formation in pine by cDNA sequencing. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 95:9693-9698
- Alméras T, Gril J, Costes E (2001) Bending of apricot-tree branches under the weight of axillary productions: confrontation of a mechanical model to experimental data. *Trees : Structure and Function* (sous presse)
- Alteyrac J, Fourcaud T, Castera P, Stokes A (1999) Analysis and simulation of stem righting movements in Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). In: Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, Third Workshop of IUFRO, La Londe-Les-Maures (France), pp 105-112
- Ancelin P, Fourcaud T, Lac P (1999) Non linear structural analysis to investigate tree biomechanics. In: Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, Third Workshop of IUFRO, La Londe-Les-Maures (France), pp 95-104
- Archer R (1986) Growth stresses and strains in trees, Springer Series in Wood Science, E. Timell, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New-York
- Baba K, Adachi K, Take T, Yokoyama T, Itoh T, Nakamura T (1995) Induction of tension wood in GA3-treated branches of the weeping type of Japanese cherry, *Prunus spachiana*. *Plant & Cell Physiology* 36:983-988
- Baillères H (1994) Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'*Eucalyptus* (Pointe Noire - Congo): hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques. Ph D Thesis, Université de Bordeaux I
- Baillères H, Chanson B, Fournier M, Tollier M, Monties B (1995) Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'eucalyptus. *Annales des Sciences Forestières* 52:157-172
- Bamberger Y (1997) Mécanique de l'ingénieur III. Solides déformables, Hermann, Editeurs des sciences et des arts
- Barnola P, Crabbé J (1993) L'activité cambiale, composante active ou passive dans les réactions de croissance de l'arbre ? *Acta botanica Gallica* 140:403-12

- Barthélémy D, Caraglio Y, Costes E (1997) Architecture, gradients morphogénétiques et âge physiologique chez les végétaux. In: Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux, Paris, pp 89-136
- Blaise F, Gril J, Fournier M (1992) Introduction de concepts mécaniques dans un logiciel de simulation de la croissance des plantes. In: Architecture Structure et Mécanique de l'Arbre, LMGC, Montpellier, pp 171-185
- Borchert R, Honda H (1984) Control of development in the bifurcating branch system of *tabebuia rosea* : a computer simulation. *Bot. Gaz.* 145:184-195
- Bordonné P (1989) Module dynamique et frottement intérieur dans le bois. Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Ph D Thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy
- Borkowska B (1966) Gravimorphism in young apple trees : sensitivity to gravity stimulus during dormancy and growth. *Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, Série Sciences Biologiques* 14:564-567
- Borkowska B, Jankiewicz LS (1972) The influence of gravity on bud development in apple trees and in poplars. *Acta Agrobotanica* 25:185-194
- Boudon F (2000) Développement d'un modèle géométrique paramétrique de représentation 3D d'une plante. Master of science Thesis, Univ. Montpellier II (France)
- Bouillet J (1993) A method of characterizing irregularity in stem cross section and its development over time. *Annales des Sciences Forestières* 50:187-203
- Bradshaw HDJ, Stettler RF (1995) Molecular genetics of growth and development in *Populus*. IV. Mapping QTLs with large effects on growth, form, and phenology traits in a forest tree. *Genetics* 139:963-973
- Briand C, Campion S, Dzambo D, Wilson K (1999) Biomechanical properties of the trunk of the devil's walking stick (*Aralia spinosa*; *Araliaceae*) during the crown-building phase: implications for tree architecture. *American Journal of Botany* 86:1677-1682
- Briand C, Daniel A, Wilson K, Woods H (1998) Allometry of axis length, diameter, and taper in the devil's walking stick (*Aralia spinosa*; *Araliaceae*). *American Journal of Botany* 85:1201-1206
- Cannell MGR, Morgan J (1987) Young's modulus of sections of living branches and tree trunks. *Tree Physiology* 3:355-364
- Castera P, Morlier V (1991) Growth patterns and bending mechanics of branches. *Trees* 5:232-238
- Causton D, Venus J (1981) *The biometry of plant growth*, Edward Arnold, London, UK
- Chambon O (1995) Etude des modalités du ploiement chez l'abricotier: cultivars Lambertin n°1 et Modesto. Thesis, Université H. Poincaré Nancy I
- Champagnat P (1954) Les corrélations sur le rameau d'un an des végétaux ligneux. *Phyton (B Aires)* 4:1-102
- Clanet H, Salles JC (1974) Contribution à l'étude de la fructification de l'abricotier dans des conditions climatiques différentes. *Annales de l'Amélioration des Plantes* 24:97-127

- Costes E (1993) Architecture aérienne de l'abricotier en développement libre. *Acta Botanica Gallica* 140:249-261
- Costes E (1999) Consequences of the architectural development of apricot trees on the design of new training systems. *Acta Horticulturae* 488:521-525
- Costes E, Audubert A, Jaffuel S, Jay M, Demene M, Lichou J (1995a) Chronologie du développement du fruit en relation avec la croissance végétative chez l'abricotier *Prunus armeniaca* L. cv. Rouge du Roussillon. *Canadian Journal of Botany* 73:1548-1556
- Costes E, De Reffye P, Lichou J, Guédon Y, Audubert A, Jay M (1992) Stochastic modelling of apricot growth units and branching. In: *Acta Horticulturae*, pp 89-98
- Costes E, Fournier D, Salles J (2000) Changes in primary and secondary growth as influenced by crop load effects in 'Fantasme®' apricot trees. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 75:510-519
- Costes E, Godin C, Fournier M (1995b) Interaction entre phénomène de flexion et architecture chez les arbres fruitiers. In: *Architecture, Structure, Mécanique de l'Arbre*. 5ème séminaire interne, Montpellier, 1-13 Juillet, pp 29-44
- Costes E, Guédon Y (1997) Modeling the sylleptic branching on one-year-old trunks of apple cultivars. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 122:53-62
- Coté W A Jr (1967) *Wood Ultrastructure*, Washington univ. press, Seattle
- Crabbé J (1987) Aspects particuliers de la morphogénèse caulinaire des végétaux ligneux et introduction à leur étude quantitative, Editions IRSIA (Institut pour l'encouragement de la recherche scientifique pour l'industrie et l'agriculture), Bruxelles
- Crabbé J, Lakouah H (1978) Arcure et gravimorphisme chez le pommier, Mise en évidence d'effets gravimorphiques sur bourgeons isolés, après induction de ces effets en diverses conditions. *Ann Sci Nat Bot Biol Veg* 12eme serie 19:
- Cruiziat P, Génard M (1998) Approches intégrées du fonctionnement des arbres fruitiers: une introduction. In: *Architecture et Modélisation en Arboriculture Fruitière*, Montpellier (France), pp 243-252
- Dumonceau O (1995) Interprétation des différences de port chez deux cultivars d'abricotier (*Prunus armeniaca* L.) via la structure anatomique du bois, l'architecture et la mécanique de l'arbre. Master of science Thesis, Université de Nancy I
- Edelin C (1977) *Images de l'architecture des conifères*. Ph D Thesis, Université Montpellier II
- Edelin C (1991) Nouvelles données sur l'architecture des arbres sympodiaux: le concept de plan d'organisation. In: *L'arbre, biologie et développement*, 2ème Colloque International sur l'Arbre, Montpellier, France, pp 127-154
- Faust M, Miller S (1992) First international symposium on training and pruning of fruit trees. , Shepherd Stown West, Virginia, pp 334
- Fisher J, Stevenson J (1981) Occurrence of reaction wood in branches of dicotyledons and its role in tree architecture. *Botanical Gazette* 142:82-95

- Fisher JB (1985) Induction of reaction wood in Terminalia (Combretaceae): roles of gravity and stress. *Annals of Botany* 55:237-248
- Fisher JB, Honda H (1977) Computer simulation of branching pattern and geometry in terminalia, a tropical tree. *Bot. Gaz.* 138:377-384
- Fourcaud T, Lac P (1996) Mechanical analysis of the form and internal stresses of a growing tree by the finite element method. In: *Engineering Systems Design and Analysis*, ASME, Montpellier (France), pp 213-220
- Fournier D (1994) Analyse et modélisation des processus de croissance et développement qui contribuent aux performances agronomiques du Pêcher *Prunus persica* (L.) Batsch. Ph D Thesis, ENSA Montpellier
- Fournier M (1989) Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard. Ph D Thesis, I.N.P. Lorraine (France)
- Fournier M (1992) Déformations de maturation à la surface des arbres: synthèse rapide et globale des résultats en cours sur les différentes espèces. In: *Architecture, Structure, Mécanique de l'Arbre*. 4ème séminaire interne, Montpellier, 24-25 février 1992, pp 112-119
- Fournier M, Baillères H, Chanson B (1994) Tree Biomechanics: Growth, Cumulative Prestresses, and Reorientations. In: *Biomimetics*, Plenum Press New York London
- Fournier M, Chanson B (1992) Mécanique des structures évolutives et auto-adaptatives, le cas des arbres. Partie 2: modélisation biomécanique de la régulation de l'inclinaison d'un *Pinus pinaster* artificiellement incliné. In: *Architecture, Structure, Mécanique de l'Arbre*. 5ème séminaire interne, Paris, 1 décembre 1992, pp 77-91
- Fournier M, Chanson B, Guitard D, Thibaut B (1991a) Mechanics of standing trees: modelling a growing structure subjected to continuous and fluctuating loads. 1. Analysis of support stresses. *Ann. Sci. For.* 48:513-525
- Fournier M, Chanson B, Thibaut B, Guitard D (1991b) Mechanics of standing trees: modelling a growing structure subjected to continuous and fluctuating loads. 2. Three-dimensional analysis of maturation stresses in a standard broadleaved tree. *Ann. Sci. For.* 48:527-546
- Fournier M, Moulia B (1992) Mécanique des structures évolutives et auto-adaptatives, le cas des arbres. Partie 1: définitions biomécaniques. In: *Architecture, Structure, Mécanique de l'Arbre*. 5ème séminaire interne, Paris, 1 décembre 1992, pp 56-76
- Gartner BL (1991) Structural stability and architecture of vines vs. shrubs of poison oak, *Toxicodendron diversilobum*. *Ecology* 72:2005-2015
- Gautier M (1987) *La culture fruitière - tome 1: l'arbre fruitier*, Aa, Paris
- Godin C, Caraglio Y (1998) A multiscale model of plant topological structures. *Journal of Theoretical Biology* 191:1-46
- Godin C, Guédon Y, Costes E (1999) Exploration of a plant architecture database with the AMAPmod software illustrated on an apple tree hybrid family. *Agronomie* 19:163-84

- Grzeskowiak V, Sassus F, Fournier M (1996) Macroscopic staining, longitudinal shrinkage due to growth and drying of poplar (*Populus x euramericana* [P. 'I-214']) tension wood. *Ann. Sci. For.* 53:1083-1097
- Guédon Y, Costes E (1997) Modelling growth of a plant axis. In: *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*, Paris
- Guédon Y, Costes E (1999) A statistical approach for analyzing sequences in fruit tree architecture. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Computer Modelling in Fruit Research and Orchard Management*, Wageningen, pp 281-288
- Guédon Y, Costes E, Caraglio Y (1998) Modélisation de structures végétales résultant de la succession d'entités botaniques élémentaires. In: *L'arbre, biologie et développement, 2ème Colloque International sur l'Arbre*, Montpellier, France
- Hallé F, Oldeman R (1970) *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*, Masson et Cie, Liège
- Hallé F, Oldeman R, Tomlinson PB (1978) *Tropical trees and forests*, Springer-Verlag, Berlin
- Hertzberg M, Olsson O (1998) Molecular characterisation of a novel plant homeobox gene expressed in the maturing xylem zone of *Populus tremula x tremuloides*. *Plant Journal* 16:285-295
- Honda H, Tomlinson PB (1982) Two geometrical models of branching of botanical trees. *Ann. Bot.* 49:1-11
- Jaccard P (1919) *Nouvelle recherches sur l'accroissement en épaisseur des arbres*. Payot et Cie, Lausanne, Genève
- Jackson DI, Coombe BG (1966) The growth of apricot fruit. I . Morphological changes during the development and the effects of various tree factors. *Australian Journal of Agricultural Research* 17:465-477
- Janick J (1972) *Horticultural science*, WH Freeman and company, San Francisco, California (USA)
- Jankiewicz LS, Antoszewski R, Klimowicz E (1967) Distribution of labelled assimilates within a young apple tree after supplying $^{14}\text{CO}_2$ to a leaf or shoot. *Biologia Plantarum* 9:116-121
- Jay M, Lichou J, Costes E, Audubert A (1995a) Architecture de l'abricotier. I - organisation naturelle de la ramification. *Infos - Ctifl* 115:32-37
- Jay M, Lichou J, Costes E, Audubert A (1995b) Architecture de l'abricotier - II - Evolution de l'arbre et mise à fruits. *Infos - Ctifl* 116:28-33
- Jay M, Lichou J, Costes E, Audubert A (1995c) Architecture de l'abricotier. III - Utilisation de la flexion naturelle comme principe de conduite. *Infos - Ctifl* 117:39-43
- Jirasek C, Prusinkiewicz P, Moulia B (2000) Integrating biomechanics into developmental models expressed using L-Systems. In: *Plant Biomechanics*, Freiburg-Badenweiler, pp 615-624
- Jodin (1994) *Le bois : matériau d'ingénierie*, ARBOLOR, Nancy

- Kaya Z, Sewell MM, Neale DB (1999) Identification of quantitative trait loci influencing annual height- and diameter-increment growth in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Theoretical & Applied Genetics* 98:586-592
- Kervella J, Pagès L, Génard M (1994) Genotypic differences in the length-diameter relationship of branches of one-year-old Peach and Nectarine trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 119:616-9
- Kobayashi M, Yoshizawa K, Sakurai A, Nakamura T (1996) Analysis of endogenous gibberellins and abscisic acid in vegetative shoots of normal and weeping Japanese cherry (*Prunus spachiana*). *Bioscience Biotechnology & Biochemistry* 60:159-160
- Kollmann F, Côté W (1968) Principles of wood science and technology. I : solid wood, Springer-Verlag, New York
- Kozłowski T (1971) Growth and development of trees. Vol. II Cambial growth, root growth, and reproductive growth, Academic Press, New York (USA)
- Kubler H (1987) Growth stresses in trees and related wood properties. *Forestry Abstracts* 48:131-189
- Lachaud S (1986) Modalités de la réactivation cambiale et de la xylogénèse chez les dicotylédones arborescences. In: Colloque International sur l'Arbre, Montpellier, France pp 47-60
- Lakhoua H, Crabbé J (1975a) Arching and gravimorphism in apples. I. Effects of various degrees of arching on the shape of branching and vigour. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* 10:43-54
- Lakhoua H, Crabbé J (1975b) Arcure et gravimorphisme chez le pommier. III. Effets de diverses époques d'arcure échelonnées de l'automne au débourrement printanier. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* 10:65-74
- Lakhoua H, Crabbé J (1975c) Arcure et gravimorphisme chez le pommier. IV. Effets du redressement à divers moments, de la période hivernale au débourrement, de plants arqués en novembre. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* 10:75-84
- Laroze S (1980) Résistance des matériaux et structures. Tome 2: Théorie des poutres, Eyrolles, Masson
- Laurens F, Audergon J, Claverie J, Duval H, Germain E, Kervella J, Lelezeq M, Lauri P, Lespinasse J (2000) Integration of architectural types in French programmes of ligneous fruit species genetic improvement. *Fruits* 55:141-152
- Laurens F, Audergon J, Claverie J, Duval H, Germain E, Kervella J, Lelezeq M, Lauri P, Lespinasse JM (1998) Variabilité génétique et prise en compte des caractéristiques de l'arbre dans les programmes d'amélioration génétique des espèces fruitières ligneuses à l'INRA. In: Architecture et Modélisation en Arboriculture Fruitière, Montpellier (France), pp 110-124
- Lauri P, Lespinasse J (2001) Genotype of apple trees affects growth and fruiting responses to shoot bending at various times of year. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 126:169-174

- Lauri PE, Lespinasse JM (1998) L'arbre fruitier et sa conduite en verger : évolution des concepts: l'exemple du pommier. In: Architecture et Modélisation en Arboriculture Fruitière, Montpellier (France), pp 126-132
- Lauri PE, Lespinasse JM (1999) Apple tree training in France: current concepts and practical implications. *Fruits* 54:441-449
- Lauri PE, Téroutte E (1999) Effects of inflorescence removal on the fruit set of the remaining inflorescences and development of the laterals on one year old apple (*Malus domestica* Borkh.) branches. *Journal of Horticultural Science* 74:110-117
- Lawson DM, Hemmat M, Weeden NF (1995) The use of molecular markers to analyze the inheritance of morphological and developmental traits in apple. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120:532-537
- Leiser AT, Kemper JD (1973) Analysis of stress distribution in the sapling tree trunk. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 98:164-170
- Lemaitre, Chaboche (1985) *Mécanique des matériaux solides*, Bordas, Paris
- Lespinasse JM (1996) Apple orchard management practices in France, from the vertical axis to the solaxe. *Compact Fruit Tree* 29:83-88
- Lichou J, Audubert A (1989) *L'abricotier*. CTIFL ed., Paris (France)
- Lichou J, Jay M (1996) Abricotier: le renouvellement par la flexion. *L'Arboriculture Fruitière* 498:26-31
- Lichou J, Jay M (1998) Position architecturale et variation de la qualité. *L'Arboriculture Fruitière* 516:27-30
- Lilleland O (1930) Growth study of apricot fruit. *Proceedings of the American Society for Horticultural Sciences* 27:237-245
- Mamada S, Kawamura Y, Yashiro M, Taniguchi T (1984) The strength of plantation of Sugi Trees. *Mokuzai Gakkaishi* 30:530-537
- Milne R, Blackburn P (1989) The elasticity and vertical distribution of stress within stems of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology* 5:195-205
- Morgan J, Cannell MGR (1987) Structural analysis of tree trunks and branches: tapered cantilever beams subject to large deflections under complex loading. *Tree Physiology* 3:365-374
- Moulia B (1993) *Etude mécanique du port foliaire du maïs*. Ph D Thesis, Université Bordeaux I (France)
- Mullins MG (1965) The gravitational responses of young apples trees. *Journal of Horticultural Science* 40:237-247
- Nakamura T, Saotome M, Ishiguro Y, Itoh R, Higurashi S, Hosono M, Ishii Y (1994) The effects of GA₃ on weeping of growing shoots of the Japanese cherry, *Prunus spachiana*. *Plant & Cell Physiology* 35:523-527
- Nakamura T, Saotome M, Tanaka H (1995) Weeping habit and gibberellin in *Prunus*. *Acta Horticulturae* 273-280

- Nakamura T, Tsushima M (1997) Chemical control of growth direction by gibberellin in the branches of weeping *Prunus* trees. *Plant Biomechanics* 37-42
- Nakamura T, Tsushima M, Nakagawa Y (2000) The effect of Brassinolide on the growing shoots of Japanese cherry, *Prunus spachiana*. In: proceedings of the 3rd Plant Biomechanics Conference, Freiburg, Badenweiler 2000, pp 207-212
- Niklas K (1993) The scaling of plant height: A comparison among major plant clades and anatomical grades. *Annals of Botany* 72:165-172
- Niklas K (1994) The allometry of safety-factors for plant height. *American Journal of Botany* 81:345-351
- Niklas K (1995a) Plant height and the properties of some herbaceous stems. *Annals of Botany* 75:133-142
- Niklas K (1995b) Size-dependent allometry of tree height, diameter and trunk-taper. *Annals of Botany* 75:217-227
- Niklas K (1999b) The mechanical role of bark. *American Journal of Botany* 86:465-469
- Niklas K, Kerchner V (1984) Mechanical and photosynthetic constraints on the evolution of plant shape. *Paleobiology* 10:79-101
- Niklas K, Molina-Freaner F, Tinoco-Ojanguren C (1999) Biomechanics of the columnar cactus *Pachycereus pringlei*. *American Journal of Botany* 86:767-775
- Niklas K, Spatz H (2000b) Wind-induced stresses in cherry trees: evidence against the hypothesis of constant stress levels. *Trees Structure & Function* 14:230-237
- Niklas KJ, Molina-Freaner F, Tinoco-Ojanguren C, Paolillo DJ, Jr. (2000) Wood biomechanics and anatomy of *Pachycereus pringlei*. *American Journal of Botany* 87:469-481
- Okasha K, Crane J (1963) Vegetative and fruit responses of the apricot and peach to maleic hydrazide. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 83:234-239
- Oldeman R (1974) L'architecture de la forêt guyanaise. Ph D Thesis, ORSTOM, Montpellier (France)
- Osler G, West P, Downes G (1996) Effects of bending stress on taper and growth of stems of young *Eucalyptus regnans* trees. *Trees Structure & Function* 10:239-246
- Plomion C, Pionneau C, Brach J, Costa P, Bailleres H (2000) Compression wood-responsive proteins in developing xylem of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Plant Physiology* 123:959-969
- Polhemus (1993) 3SPACE FASTRAK user's manual, Polhemus INC., Cochester VT (USA)
- Prusinkiewicz P (1998) Modeling of spatial structure and development of plants: a review. *Scientia Horticulturae* 74:113-149
- Pruyn ML, Ewers BJ, Telewski FW (2000) Thigmomorphogenesis: changes in the morphology and mechanical properties of two *Populus* hybrids in response to mechanical perturbation. *Tree Physiology* 20:535-540
- De Reffye P, Elguero E, Costes E (1991) Growth units construction in trees: a stochastic approach. *Acta Biotheoretica* 39:3-4

- De Reffye P, Houllier F (1998) L'architecture des plantes et son utilisation en agronomie: bilan et perspective. Architecture et Modélisation en Arboriculture Fruitière, Montpellier (France), pp 9-21
- Rey H, Godin C, Guédon Y (1997) Vers une représentation formelle des plantes. In: Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux, Paris, pp 139-172
- Rivals P (1965) Essai sur la croissance des arbres et sur leurs systèmes de floraison (application aux espèces fruitières) - I -. Journal d'Agriculture Tropicale et de Botanique Appliquée XII:655-686
- Robards A (1965) Tension wood and eccentric growth in crack willow (*Salix fragilis*, L.). Annals of Botany 29:419-430
- Robards A (1966) The application of the modified sine rule to tension wood production and eccentric growth on the stem of Crack Willow (*Salix fragilis* L.). Annals of Botany 30:513-523
- Rowe N (2000) The insides and outsides of plants: the long and chequered evolution of secondary growth. In: proceedings of the 3rd Plant Biomechanics Conference, Freiburg, Badenweiler 2000, pp 129-140
- Rowe N, Speck T (1996) Biomechanical characteristics of the ontogeny and growth habit of the tropical liana *Condylocarpon guianense* (Apocynaceae). Int. Journal of Plant Sciences 157:406-417
- Sassus F (1998) Déformations de maturation et propriétés du bois de tension chez le hêtre et le peuplier : mesures et modèles. Ph D Thesis, ENGREF (France)
- Shigo AL (1990) Tree branch attachment to trunks and branch pruning. HortScience 25:54-59
- Shinozaki K, Yoda K, Hozumi K, Kira T (1964) A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory. I : basic analyses. Japanese Journal of Ecology 14:97-105
- Sinnot E (1952) Reaction wood and the regulation of tree form. American Journal of Botany 39:69-78
- Sinoquet H, Rivet P, Drouet J (1997) Méthodes de digitalisation et de visualisation 3D de l'architecture des plantes. In: Séminaire sur la modélisation architecturale, Paris, 10-12 mars 1997, pp 31-37
- Smith H, Wareing PF (1964) Gravimorphism in trees. 2. The effect of gravity on bud-break in Osier Willow. Annals of Botany 28:283-295
- Smith H, Wareing PF (1964) Gravimorphism in trees. 3. The possible implication of root factor in the growth and dominance relationships of the shoots. Annals of Botany 28:297-309
- Smith H, Wareing PF (1966) Apical dominance and the effect of gravity on nutrient distribution. Planta 70:87-94
- Speck T, Spatz H, Vogellehner D (1990) Contributions to the biomechanics of plants. I. Stabilities of plant stems with strengthening elements of different cross-sections against weight and wind forces. Botanica Acta 103:111-122
- Spicer R, Gartner B (1998) Hydraulic properties of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) branches and branch halves with reference to compression wood. Tree Physiology 18:777-784
- Suzuki M, Hiura T (2000) Allometric differences between current-year shoots and large branches of deciduous broad-leaved tree species. Tree Physiology 20:203-209

- Thibaut B (1989) Intérêt d'une approche globale "Architecture, Structure et Mécanique de l'arbre". In: Architecture, Structure, Mécanique de l'Arbre. 1er séminaire interne, Montpellier, 26-27 janvier 1989, pp 4-7
- Timoshenko S (1966) Théorie de la stabilité élastique, Dunod, Paris
- Traiser C, Reidelsturz P, Speck T (1997) Biomechanical, anatomical and morphological analysis of different growth habits in the genus *Lonicera*. Plant Biomechanics 17-18
- Tsonev R, Tsoneva E (1995) The growing habits of one-year-old branches in some apricot varieties. Acta Horticulturae 449-453
- Wareing PF, Nasr TAA (1958) Gravimorphism in trees. Effects of gravity on growth, apical dominance and Flowering in fruit-trees. Nature 182:379-381
- Wareing PF, Nasr TAA (1961) Gravimorphism in trees. 1. Effect of gravity on growth and apical dominance in fruit trees. Annals of Botany 25:321-340
- West PW, Jackett DR, Sykes SJ (1989) Stresses in, and the shape of, tree stems in forest monoculture. Journal of Theoretical Biology 140:327-343
- White J (1979) The plant as a metapopulation. Ann Rev Ecol Syst 10:109-45
- Wicker M (1979) Le bois de tension: acquisitions récentes. Année Biologiques XVIII:221-254
- Wilson B, Archer R (1977) Reaction wood: induction and mechanical action. Ann. Rev. Plant Physiol. 28:23-43
- Wilson BF (1973) White pine shoots: roles of gravity and epinasty in movements and compression wood location. Am. J. Bot. 60:597-601
- Wilson BF (1997) Response to stem bending in forest shrubs: stem or shoot reorientation and shoot release. Canadian Journal of Botany 75:1643-1648
- Wilson BF (2000) Apical control of branch growth and angle in woody plants. American Journal of Botany 87:601-607
- Wilson BF, Gartner BL (1996) Lean in red alder (*Alnus rubra*): growth stress, tension wood, and righting response. Canadian Journal of Forest Research 26:1951-1956
- Yoshida M, Nakamura T, Yamamoto H, Okuyama T (1999) Negative gravitropism and growth stress in GA₃-treated branches of *Prunus spachiana* Kitamura f. *spachiana* cv. *Plenarosea*. Journal of Wood Science 45:368-372
- Yoshida M, Yamamoto H, Okuyama T (2000) Estimating the equilibrium position by measuring growth stress in weeping branches of *Prunus spachiana* Kitamura f. *spachiana* cv. *Plenarosea*. Journal of Wood Science 46:59-62
- Yoshizawa N, Okamoto Y, Idei T (1986) Righting movement and xylem development in tilted young conifer trees. Wood & Fiber Science 18:579-589
- Young W (1989) Roark's formulas for stress and strain. 6th edition ed., McGraw-Hill Book Company

Liste des figures

Partie I

Figure 1 : schématisation des relations entre les différentes composantes de l'architecture.

Figure 2 : représentation schématique de la croissance cambiale.

Figure 3 : structure de la paroi d'une cellule ligneuse (d'après Coté, 1967).

Figure 4 : méplat et excentricité.

Figure 5 : lien entre les déformations de maturation dans une couche périphérique et le redressement.

Figure 6 : schématisation des relations entre les différentes composantes de l'architecture, intégrant la croissance secondaire et la biomécanique.

Partie II

Figure 1 : essai de traction uniaxiale.

Figure 2 : diagramme contraintes/déformations.

Figure 3 : repère d'orthotropie local du bois.

Figures 4abc : trois des composantes du tenseur des déformations.

Figure 5 : repère d'orthotropie d'un élément de poutre.

Figures 6 à 10 : déplacement de la section (translation selon X , translation selon Z , translation selon Y , rotation autour de X , rotation autour de Z).

Figures 11 : trois cas de non concordance des repères d'orthotropie : la conicité, la fibre torse et l'excentricité.

Figures 12abc : traduction locale des déformations d'un élément.

Figure 13 : point d'application et résultante des efforts extérieurs au niveau d'un élément.

Figure 14 : flexion d'une poutre droite sous hypothèse de petits déplacements.

Figure 15 : variation du bras de levier au cours de la déformation, sous HPP et en grands déplacements.

Figure 16 : spécification des données nécessaires au calcul de la flexion d'un axe sous charge pondérale.

Figure 17 : allure des déformées calculées avec différentes charges.

Figure 18 : cas d'un élément soumis à un grand bras de levier.

Figure 19 : représentation des efforts intérieurs sur un diagramme moment/courbure.

Figure 20 : représentation des efforts extérieurs sur un diagramme moment/courbure.

Figure 21 : repr. des efforts ext. sur un diagramme moment/courbure en fonction de l'inclinaison initiale.

Figure 22 : repr. des efforts ext. sur un diagramme moment/courbure en fonction du chargement.

Figure 23 : recherche de l'équilibre sous hypothèse de petits déplacements.

Figure 24 : rech. de l'éq. par la méthode du fractionnement de la charge.

Figure 25 : rech. de l'éq. par la méthode des approximations successives. Cas de convergence monotone.

Figure 26 : rech. de l'éq. par la méthode des approx. successives. Cas de convergence non-monotone.

Figure 27 : recherche de l'équilibre par la méthode des approximations successives. Cas de divergence.

Figure 28 : effet de l'introduction d'un amortissement dans un cas de divergence de la méthode des approximations successives.

Figure 29 : comparaison entre la déformée calculée sous HPP et la déformée exacte.

Figure 30 : facteur de correction pour tenir compte des grands dépl. à partir d'un calcul fait sous HPP.

Figure 31 : effet de l'interaction entre un charge temporaire et la croissance en diamètre.

Figure 32 : représentation d'un secteur de bois de tension d'extension tangentielle donnée.

Partie III

Figure 0 : illustration de la diversité des ports de l'abricotier.

Figure 1 : mesure du méplat des axes.

Figure 2 : dispositif de mesure de digitalisation 3D.

Figure 3 : prétraitement des données de digitalisation.

Figure 4 : dispositif de mesure de module sur banc d'essai (flexion 3 points).

Figure 5 : principe de la mesure en flexion « 3 points ».

Figure 6 : principe de la mesure en flexion « 4 points ».

Figure 7 : principe de mesure de la DRL par la méthode des deux rainures.

Figure 8 : Exemples de coupes sur lesquelles le bois de tension est visible sans coloration.

Partie IV

Figure 1 : illustration des descripteurs d'élancement et de conicité.

Figure 2 : corrélation entre le diamètre à la base et le diamètre moyen des axes.

Figure 3 : corrélation entre l'inertie équivalente au diamètre moyen et l'inertie moyenne de l'axe.

Figure 4 : corrélation entre l'inclinaison de la corde et l'inclinaison moyenne.

Figure 5 : histogramme de la distribution des longueurs d'axes.

Figure 6 : histogramme de la distribution des longueurs moyennes des entrenœuds des axes.

Figure 7 : histogramme de la distribution des diamètres moyens.

Figure 8 : histogramme de la distribution des diamètres à l'extrémité.

Figure 9 : histogramme de la distribution des moyennes de l'inertie.

Figure 10 : indice de méplat en fonction de la position dans l'axe.

Figure 11 : histogramme de la distribution de l'élancement.

Figure 12 : histogramme de la distribution de la conicité.

Figure 13 : évolution du diamètre le long de trois axes typiques de chaque variété étudiée.

Figure 14 : histogramme de la distribution du volume des axes.

Figure 15 : histogramme de la distribution des inclinaisons moyennes.

Figure 16 : histogramme de la distribution des inclinaisons à la base.

Figure 17 : histogramme de la distribution de la courbure totale des axes.

Figure 18 : histogramme de la distribution de la rectitude des axes.

Figure 19abc : forme initiale des axes du sous-échantillon 'validation'.

Figure 20 : relation entre la moyenne de l'inertie et le diamètre moyen.

Figure 21 : relation entre le diamètre moyen et la longueur.

Figure 22 : relation entre la courbure globale et la l'inclinaison moyenne.

Figure 23 : représentation schématique de la forme des axes sur un diagramme courbure / inclinaison.

Figure 24 : représentation schématique des « axes moyens » de chaque variété.

Figure 25 : relation d'allométrie entre la masse et la largeur des fruits pour les trois variétés.

Figure 26 : relation d'allométrie entre la masse et le nombre de feuilles pour les pousses courtes de la variété 'Lambertin'.

Figure 27 : relation d'allométrie entre la masse et le nombre de feuilles pour les pousses longues.

Figure 28 : Calendrier des principaux événements phénologiques pour les trois variétés.

Figure 29 : histogramme de la distribution des pourcentages de nœuds portant des pousses à la fin de la saison.

Figure 30 : histogramme de la distribution du pourcentage de pousses longues parmi les pousses.

Figure 31 : histogramme de la distribution de la fraction des pousses représentées par le prolongement.

Figure 32 : histogramme de la distribution de la position relative du centre de gravité des pousses en fin de saison.

Figure 33 : dynamique de croissance des pousses pour les axes sans pousses longues des variétés 'Lambertin' et 'Palsteyn'.

Figure 34 : dynamique de croissance des pousses pour les axes avec pousses longues des trois variétés étudiés.

Figure 35 : histogramme de la distribution de la fraction massique des pousses longues.

Figure 36 : histogramme de la distribution de la masse de pousses à la « date 1 » (voir dans le texte).

Figure 37 : histogramme de la distribution de la masse de pousses à la récolte.

Figure 38 : histogramme de la distribution de la masse de pousses en fin de saison.

Figure 39 : dynamique de chute des fruits pour les trois variétés étudiées.

Figure 40 : histogramme de la distribution du nombre de fruits à la nouaison.

Figure 41 : histogramme de la distribution du nombre de fruits après les chutes physiologiques.

Figure 42 : histogramme de la distribution du nombre de fruits à la récolte.

Figure 43 : histogramme de la distribution de la position relative des fruits après les chutes physiologiques.

Figure 44 : dynamique de la charge totale en fruits par axe.

Figure 45 : dynamique de grossissement des fruits.

Figure 46 : histogramme de la distribution de la masse de fruits après les chutes physiologiques.

Figure 47 : histogramme de la distribution de masse de fruit à la récolte.

Figure 48 : histogramme de la distribution de la fraction massique des fruits après les chutes physiologiques.

Figure 49 : histogramme de la distribution de la fraction massique des fruits à la récolte.

Figure 50 : dynamique d'évolution de la position relative du chargement sur les axes sans fruits.

Figure 51 : dynamique d'évolution de la position relative du chargement sur les axes avec fruits.

Figure 52 : histogramme de la distribution de la position relative du chargement total à la récolte.

Figure 53 : dynamique de chargement total des axes avec fruits.

Figure 54 : dynamique de chargement total des axes sans fruits.

Figure 55 : histogramme de la distribution de la charge totale après les chutes physiologiques.

Figure 56 : histogramme de la distribution de la charge totale à la récolte.

Figure 57 : relation entre la masse des UC1 et le diamètre moyen en début de saison.

Figure 58 : histogramme de la distribution du diamètre moyen en fin de saison.

Figure 59 : histogramme de la distribution des accroissements relatifs de diamètre sur la saison.

Figure 60 : histogramme de la distribution des accroissements relatifs d'inertie sur la saison.

Figure 61 : dynamique de croissance en diamètre des axes avec pousses longues.

Figure 62 : dynamique de croissance en diamètre des axes sans pousses longues.

Figure 63 : dynamique des accroissements hebdomadaires moyens de diamètre.

Figure 64 : dynamique d'évolution de l'inertie des axes avec pousses longues.

Figure 65 : dynamique d'évolution de l'inertie des axes sans pousses longues.

Figure 66 : histogramme de la distribution des accroissements relatifs d'inertie entre le début de la saison et la « date 1 ».

Figure 67 : histogramme de la distribution des accroissements relatifs d'inertie entre le début de la saison et la récolte.

Figure 68 : histogramme de la distribution de la part de l'inertie totale réalisée avant la récolte.

Figure 69 : dynamique conjointe de croissance I et II pour les axes avec pousses longues de 'Lambertin'.

Figure 70 : dynamique conjointe de croissance I et II pour les axes sans pousses longues de 'Lambertin'.

Figure 71 : dynamique conjointe de croissance I et II pour un axe avec UC3 de la variété 'Lambertin'.

Figure 72 : dynamique conjointe de croissance I et II pour les axes avec pousses longues de 'Modesto'.

Figure 73 : dynamique conjointe de croissance I et II pour les axes avec pousses longues de 'Palsteyn'.

Figure 74 : dynamique conjointe de croissance I et II pour les axes sans pousses longues de 'Palsteyn'.

Figure 75 : relation entre la masse totale de pousses et l'accroissement de diamètre sur toute la saison.

Figure 76 : relation entre la variation de courbure totale et la variation d'inclinaison.

Figure 77 : histogramme de la distribution des variations de courbure totale entre le début de saison et la récolte pour les trois variétés étudiées.

Figure 78 : histogramme de la distribution des variations de courbure totale entre le début de saison et la chute des feuilles pour les trois variétés étudiées.

Figure 79 : dynamique de flexion pour les axes avec fruits.

Figure 80 : dynamique de flexion pour les axes sans fruits.

Figure 81 : évolution de l'inclinaison à la base.

Figure 82 : histogramme de la distribution des variations d'inclinaison à la base.

Figure 83 : synchro. entre flexion et accroissement de l'inertie pour les axes avec fruits de 'Lambertin'.

Figure 84 : synchro. entre flexion et accroissement de l'inertie pour les axes sans fruits de 'Lambertin'.

Figure 85 : synchro. entre flexion et accroissement de l'inertie pour les axes avec fruits de 'Modesto'.

Figure 86 : synchro. entre flexion et accroissement de l'inertie pour les axes sans fruits de 'Modesto'.

Figure 87 : synchro. entre flexion et accroissement de l'inertie pour les axes avec fruits de 'Palsteyn'.

Figure 88 : synchro. entre flexion et accroissement de l'inertie pour les axes sans fruits de 'Palsteyn'.

Figure 89 : représentation schématique des « axes moyens » de chaque variété aux différentes dates.

Figure 90 : distributions des modules d'élasticité estimés par la méthode de flexion 3 points.

Figure 91 : distributions des modules d'élasticité estimés par la méthode de flexion 4 points.

Figure 92 et 93 : comparaison des résultats obtenus en flexion 3 points et 4 points pour des tronçons entiers et annelés au niveau des appuis.

Figure 94 : relation entre le module d'élasticité estimé en flexion 3 points et le diamètre du tronçon.

Figure 95 : relation entre le module d'élasticité estimé en flexion 3 points et la position dans la pousse.

Figure 96 : essai de fluage pratiqué en hivernis : évolution au cours du temps de la forme d'un axe ligneux soumis à un poids constant.

Figure 97 : diminution relative du module d'élasticité apparent au cours des essais de fluage.

Figure 98 : distributions des déformations résiduelles à la périphérie pour les trois variétés (toutes séries de mesure et positions confondues).

Figure 99 : distribution des déformations de maturation en fonction de la position dans l'axe.

Figure 100 : distributions des déformations résiduelles à la périphérie, pour les trois séries de mesures (toutes variétés et positions confondues).

Figure 101 : état mécanique dans les couches périphériques des axes.

Figure 102 : coloration, identification et représentation paramétrique des zones de bois de tension en coupe transversale.

Figure 103 : illustration du descripteur de l'excentricité.

Figure 104 : coupe transversale de 'Lambertin' colorée au bleu astra / safranine.

Figures 105 et 106 : Histogrammes de distribution des pourcentages de bois de tension sur toutes les sections analysées, dans les cernes 1998 et 1999.

Figure 107 : coupe transversale de bois de un an de 'Palsteyn' en microscopie électronique à balayage.

Figures 108 et 109 : coupes transversales de bois de un an de 'Lambertin' et 'Palsteyn' vues en microscopie électronique à balayage.

Figure 110 : distribution du bois de tension dans l'axe L30.

Figures 111abc : distributions longitudinales du pourcentage de bois de tension, de la position relative du bois de tension et de l'excentrement pour les cernes 1998 et 1999 de l'axe L30.

Figure 112 : distribution du bois de tension dans l'axe M24.

Figures 113abc : distributions longitudinales du pourcentage de bois de tension, de la position relative du bois de tension et de l'excentrement pour les cernes 1998 et 1999 de l'axe M24.

Figure 114 : distribution du bois de tension dans l'axe P31.

Figures 115abc : distributions longitudinales du pourcentage de bois de tension, de la position relative du bois de tension et de l'excentrement pour les cernes 1998 et 1999 de l'axe P31.

Figures 116 à 121 : synthèse de moyennes et des intervalles de confiance pour chaque descripteur, par cerne, par variété et par position dans l'axe.

Figure 122 : relation entre la variation d'inclinaison moyenne sur la saison et le pourcentage de bois de tension par axe pour les trois variétés étudiées.

Figure 123 : distribution longitudinale moyenne du bois de tension dans les cernes 1995 dans les axes arqués et témoins.

Figure 124 : distribution du bois de tension dans l'axe BL16.

Figure 125 : distribution du bois de tension dans l'axe RO09.

Figure 126 : distribution du bois de tension dans l'axe RG15.

Figure 127 : relation entre l'inclinaison moyenne après arcure et le pourcentage de bois de tension pour les trois modalités.

Figure 128 : dynamiques conjointes de croissance des fruits, des pousses et du diamètre.

Partie V

Figures 1, 2, 3 : concordance entre variations d'inclinaison moyenne mesurées et simulées sous différentes hypothèses entre T0 et T1 .

Figure 4-abc : simulations avec E^o sous HPP (L23, M24, P40).

Figure 5-abc : simulations avec E^o en grands déplacements (L23, M24, P40).

Figure 6-abc : simulations avec E^{eq} en grands déplacements (L23, M24, P40).

Figure 7-abc : simulations avec module de structure ajusté (L23, M24, P40).

Figure 8 : relation entre la variation d'inclinaison simulée et observée aux différentes dates (E ajusté sur T0/T1, pas de maturation).

Figure 9 : évolution de la forme de l'axe L38 (E ajusté sur T0/T1, pas de maturation).

Figure 10 : évolution de la forme de l'axe M19 (E ajusté sur T0/T1, pas de maturation).

Figure 11 : évolution de la forme de l'axe P31 (E ajusté sur T0/T1, pas de maturation).

Figure 12 et 13 : évolution de la forme de l'axe P10 avec et sans délais de lignification.

Figure 14 : évolution de la forme de l'axe P10 en fin de saison avec différentes lois de réorientation.

Figure 15 : évolution de la forme de l'axe L38 en fin de saison avec différentes lois de réorientation.

Figure 16 : évolution de la forme de l'axe P31 en fin de saison avec différentes lois de réorientation.

Figure 17 : relation entre la variation d'inclinaison simulée et observée aux différentes dates (E ajusté sur T0/T1, délais de lignif. 3 sem, DLM unif. 2500 μ def).

Figure 18 : évolution de la forme de l'axe L38 (E aj. T0/T1, délais lignif. 3 sem., DLM unif. 2500 μ def).

Figure 19 : évolution de la forme de l'axe M19 (E aj. T0/T1, délais lignif. 3 sem., DLM unif. 2500 μ def).

Figure 20 : évolution de la forme de l'axe P31 (E aj. T0/T1, délais lignif. 3 sem., DLM unif. 2500 μ def).

Figure 21 : évolution de la forme de l'axe 'L38' avant récolte, après ajustement du module sur la date 1.

Figure 22 : évolution de la forme de l'axe 'L38' avant récolte, après ajustement du module sur la date 2.

Figure 23 : relation entre la variation d'inclinaison simulée et observée aux différentes dates (E ajusté sur T0/T1, délais de lignif. 3 sem, DLM unif. 4000 μ def).

Figure 24 : relation entre la variation d'inclinaison simulée et observée entre T3 et T4 (E ajusté sur T0/T1, délais de lignif. 3 sem, DLM consigne 50° - réactivité 8000 μ def/°).

Figure 25 : histogramme de distribution des valeurs de flexion unitaire par variété.

Figure 26 : relation entre flexion unitaire et rapport d'élancement.

Figure 27 : relation entre la variation théorique et la variation réelle de la courbure totale.

Figure 28 : profil de réponse de la flexion des trois variétés étudiées à l'application d'une charge variable.

Figure 29 : profil de réponse de la flexion des trois variétés étudiées à l'application d'une charge variable avec axe initialement droit.

Figure 30 : histogramme de distribution des valeurs de la flexion théoriquement « figée » par la croissance.

Figure 31 : relation entre redressement théorique et mesuré à la récolte .

Figure 32 : histogramme de distribution des valeurs de redressement actif théorique en fin de saison.

Figure 33 : relation entre redressement théorique et mesuré en fin de saison.

Figure 34 : distribution du bois de tension dans l'axe M35.

Figure 35 : distribution du bois de tension dans l'axe P31.

Partie VI

Figure 1 : jonction entre une branche de chêne rouge et le tronc (d'après Shigo 1990).

Figure 2 : distribution de déformations résiduelles le long d'axes de cerisiers pleureurs du Japon (d'après Yoshida 1999).

Figure 3 : distribution de déformations résiduelles le long d'axes de cerisiers pleureurs du Japon (d'après Yoshida 2000).

Liste des tableaux

Partie II

Tableau 1 : validation du modèle en grands déplacement par comparaison aux solutions analytiques du flambement.

Tableau 2 : influence de la valeur de l'amortissement sur la vitesse de convergence avec la méthode des approximations successives.

Tableau 3 : précision du résultat en fonction du nombre d'étapes de fractionnement pour la méthode du fractionnement de la charge.

Partie III

Tableau 1 : calendrier des mesures par variété et par échantillon.

Partie IV

Tableau 1 : matrice des corrélations des descripteurs de morphologie transverse.

Tableau 2 : matrice des corrélations des descripteurs de la géométrie de l'axe.

Tableau 3 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs de l'état initial des axes.

Tableau 4, 5, 6, 7 : matrice des corrélations des descripteurs sur l'ensemble des axes et par variété.

Tableau 8 : paramètres (α , β) et coefficient de détermination (R^2) des relations d'allométrie entre masse et dimension pour chaque type de production axillaire et chaque variété.

Tableau 9 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs de la croissance des pousses.

Tableau 10 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs de la mise à fruits.

Tableau 11 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs du chargement total.

Tableau 12 : corrélations entre les descripteurs du chargement et descripteurs de la morphologie et de la géométrie initiale.

Tableau 13 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs de l'évolution de la morphologie.

Tableau 14 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs des accroissement d'inertie.

Tableau 15 : corrélations entre les descripteurs de la croissance primaire et de la croissance secondaire toutes variétés confondues et par variété.

Tableau 16 : principaux résultats de l'analyse statistique des descripteurs de l'évolution de la géométrie.

Tableau 17 : quantification des variations de courbure totale aux différentes périodes pour les axes avec et sans fruits.

Tableau 18 : moyenne, écart type et intervalle de confiance du module d'élasticité estimé en flexion 3 points et 4 points pour les trois variétés.

Tableau 19 : moyenne et écart type du module d'élasticité estimé en flexion 3 pts sur tronçons de 1 an.

Tableau 20 : moyenne et écart type du module de cisaillement estimé sur tronçons de 2 ans.

Tableau 21 : résultats des essais de flexion instantanée *in situ* sur les axes de 'validation'.

Tableau 22 : valeur de la correction visco-élastique par variété en fonction de la durée de sollicitation.

Tableau 23 : valeurs de différentiels déformations résiduelles entre la face supérieure et la face inférieure des axes.

Tableau 24 : part des déformations de maturation théoriquement bloquées lors de la maturation d'une couche additionnelle, en fonction du diamètre initial de la tige.

Tableau 25 : déformations (ϵ) en périphérie d'une axe de diamètre (D) et de longueur (L) sous l'effet d'un redressement passif caractérisé par une variation de courbure totale ΔC_{tot} .

Tableau 26 : moyenne et intervalle de confiance (sur l'ensemble des coupes) des différents descripteurs dans les cernes 1998 et 1999.

Tableau 27 : résultats de l'analyse de variance. L'effet de la variété, de la position dans l'axe et leur interaction ont été testés pour chaque cerne annuel et chaque descripteur.

Tableau 28abcd : moyenne et intervalle de conf. des descripteurs pour chaque modalité et pour chaque cerne.

Tableau 29 : diamètre moyen en 1995, 1996 et 1998 pour les axes arqués et témoins.

Partie V

Tableau 1 : masse de charge et inertie moyenne en début de saison et à la date 1 pour les axes de 'validation'.

Tableau 2 : module d'élasticité de structure des axes de 'validation' : valeur mesurée *in situ* avec et sans prise en compte de la visco-élasticité ; valeur ajustée et qualité de l'ajustement.

Tableau 3 : critères d'adéquation pour chaque période (E ajusté sur T0/T1, pas de maturation).

Tableau 4 : critères d'adéquation pour chaque période (E ajusté sur T0/T1, délais de lignif. 3 sem, DLM unif. 2500 μ def).

Tableau 5 : critères d'adéquation pour chaque période (E ajusté sur T0/T1, délais de lignif. 3 sem, DLM unif. 4000 μ def).

Tableau 6 : flexion théorique et mesurée à la date 1 (modèle global).

Tableau 7 : donnée du calcul de profil de réponse à une charge imposée pour les axes moyens des trois variétés.

Tableau 8 : redressement théorique et mesuré à la récolte (modèle global).

Tableau 9 : redressement théorique et mesuré en fin de saison (modèle global).

Tableau 10 : bilan des principaux indices biomécaniques quantifiés par variété.

Annexes

- Annexe 1 : Caractérisation de la géométrie d'un domaine du plan par ses moments d'inertie
- Annexe 2 : Lien entre le méplat d'une section et son inertie en flexion
- Annexe 3 : Formulation du calcul de la déformée d'un axe en flexion pure
- Annexe 4 : Etude de la répétabilité des mesures de digitalisation
- Annexe 5 : Inertie de structure d'un tronçon d'axe.....
- Annexe 6 : Prise en compte de la conicité dans les flexions 3 pts
- Annexe 7 : Protocole de coloration Bleu Astra / Safranine.....
- Annexe 8 : Calcul des DLM en fonction des DRLM.....
- Annexe 9 : Compléments de résultats de simulations.....
- Annexe 10 : "Bending of apricot-tree branches under the weight of axillary productions: confrontation of a mechanical model to experimental data.".....
- Annexe 11 : Liste des codes des descripteurs utilisés

Annexe 1 : Caractérisation de la géométrie d'un domaine du plan par ses moments d'inertie

La géométrie d'un domaine quelconque du plan (Y,Z) peut être caractérisée par la valeur de ses moments. Nous envisagerons les moment d'ordre 0, 1 et 2. Ceux-ci valent :

$$M_{00} = \iint_S dydz = S \quad \text{Moment d'ordre 0 par rapport à } Y \text{ et } Z$$

$$M_{10} = \iint_S ydydz = J_Y \quad \text{Moment d'ordre 1 par rapport à } Y$$

$$M_{01} = \iint_S zdydz = J_Z \quad \text{Moment d'ordre 1 par rapport à } Z$$

$$M_{11} = \iint_S yzdydz = J_{YZ} \quad \text{Moment d'ordre 1 par rapport à } Y \text{ et } Z$$

$$M_{20} = \iint_S y^2dydz = I_Y \quad \text{Moment d'ordre 2 par rapport à } Y$$

$$M_{02} = \iint_S z^2dydz = I_Z \quad \text{Moment d'ordre 2 par rapport à } Z$$

Les valeurs de M_{10} , M_{01} , M_{20} , M_{02} , et M_{11} dépendent évidemment du référentiel choisi pour le calcul. Considérons pour l'instant que ce référentiel est quelconque et fixe. $S=M_{00}$ correspond à l'aire de la surface. M_{10}/S et M_{01}/S correspondent aux coordonnées en Y et Z du centre de masse du domaine. M_{20}/S et M_{02}/S correspondent à la variance du domaine dans les directions Y et Z , et M_{11}/S correspond à sa covariance, exprimées dans le référentiel choisi. Dans le cas d'une forme paramétrique donnée, ces paramètres ne sont pas nécessairement indépendants, et peuvent être exprimés en fonctions des paramètres qui décrivent la forme.

Pour un cercle de centre (y_0, z_0) et de rayon R :

$$\begin{array}{lll} S = \pi R^2 & I_Y = \pi R^4/4 + z_0^2 S & I_Z = \pi R^4/4 + y_0^2 S \\ J_Y = z_0 S & J_Z = y_0 S & J_{YZ} = z_0 y_0 S \end{array}$$

Considérons une ellipse dont les axes sont dans les directions Y et Z , de centre (y_0, z_0) , de demi-axe vertical R_Z et de demi-axe horizontal R_Y . Les termes de sa matrice d'inertie valent :

$$\begin{array}{lll} S = \pi R_Y R_Z & I_Y = \pi R_Y R_Z^3/4 + z_0^2 S & I_Z = \pi R_Z R_Y^3/4 + y_0^2 S \\ J_Y = z_0 S & J_Z = y_0 S & J_{YZ} = y_0 z_0 S \end{array}$$

Notons enfin que les moments d'inertie ont des propriétés d'additivité : les moments d'inertie de l'unions de deux domaines non sécants sont égaux à la somme des moments d'inertie de chacun des domaines.

Annexe 2 : Lien entre le méplat d'une section et son inertie en flexion

Soient deux sections S_0 et S_1 de même aire, la première circulaire et la seconde elliptique. S_0 est caractérisée par son rayon R . S_1 est caractérisé par son demi grand axe R_z , orienté selon la direction de la gravité et son demi petit axe R_y . Pour une même quantité de matière caractérisée par l'aire commune A , la section elliptique a une inertie en flexion supérieure à celle de la section circulaire. C'est ce gain d'inertie que nous voulons quantifier en fonction du méplat de la section. Le méplat peut être caractérisé par le rapport des demi axes :

$$i = R_z/R_x$$

L'égalité des aires impose $R_x R_z = R^2$. On a donc :

$$R_z = R i^{1/2} \qquad R_y = R/i^{1/2}$$

Les inerties en flexion valent :

$$I_0 = \pi R^4/4 \qquad I_1 = \pi R_z^3 R_x/4 = \pi i R^4/4$$

On obtient finalement : $I_1/I_0 = i$

Annexe 3 : Formulation du calcul de la déformée d'un axe en flexion pure

Considérons un axe plan en flexion pure caractérisée par sa longueur l , sa courbure initiale $C_0(s)$, sa rigidité $EI(s)$ et soumis à une charge pondérale répartie, définie par la densité linéique de charge $gm(s)$. La position de la base vaut (x_0, z_0) dans un repère extérieur (X, Z) pour lequel Z est la direction verticale. L'inclinaison de la base par rapport à l'horizontale est t_0 . On cherche la courbure en tout point à l'équilibre $C(s)$.

L'inclinaison locale de l'axe en s vaut : $t(s) = t_0 + \int_0^s C(\alpha) d\alpha$

La position du point s est donnée par :

$$x(s) = x_0 + \int_0^s \cos(t(\alpha)) d\alpha \quad z(s) = z_0 + \int_0^s \sin(t(\alpha)) d\alpha$$

Le moment de flexion exercé en s par la partie avale vaut :

$$\Delta M_y(s) = g \int_s^l (x(\alpha) - x(s)) m(\alpha) d\alpha = g \int_s^l \left(\int_s^{\alpha_1} \cos(t(\alpha_2)) d\alpha_2 \right) m(\alpha_1) d\alpha_1$$

Dans le cas général, $\Delta M_y(s)$ dépend de $C(s)$:

$$\Delta M_y(s) = g \int_s^l \left(\int_s^{\alpha_1} \cos \left(t_0 + \int_0^{\alpha_2} C(\alpha_3) d\alpha_3 \right) d\alpha_2 \right) m(\alpha_1) d\alpha_1$$

L'équilibre est donnée par : $\Delta C(s) = \frac{\Delta M_y(s)}{EI(s)}$

La solution est alors donnée par une équation différentielle dont la résolution n'est pas triviale en général.

Sous HPP, on néglige les variations de $C(s)$ dans le calcul du moment. Celui-ci peut alors être intégré connaissant la courbure initiale $C_0(s)$:

$$\Delta M^0_y(s) = g \int_s^l \left(\int_s^{\alpha_1} \cos \left(t_0 + \int_0^{\alpha_2} C_0(\alpha_3) d\alpha_3 \right) d\alpha_2 \right) m(\alpha_1) d\alpha_1$$

La variation de courbure peut alors être explicitée : $\Delta C(s) = \frac{\Delta M^0_y(s)}{EI(s)}$

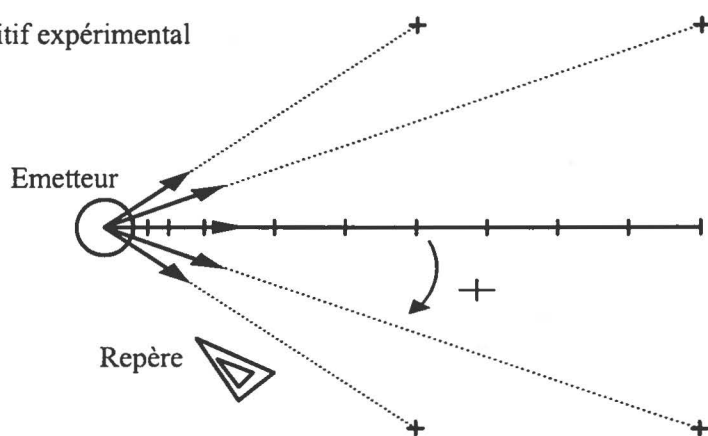
La déformée est finalement donnée par : $C(s) = C_0(s) + \frac{\Delta M^0_y(s)}{EI(s)}$

Annexe 4 : Etude de la répétabilité des mesures de digitalisation

➤ Dispositif expérimental

L'ensemble des mesures a été effectué le 18/08/98 entre 9h et 12h dans le verger de Melgueil. Le dispositif a été monté aussi loin que possible de toute masse métallique, dans une allée plane enherbée. Dix piquets en bois d'environ 10 cm de haut et 1 cm de diamètre ont été plantés en ligne, espacés de 15 cm, 25 cm puis tous les 50 cm (fig. 1). Le dispositif de mesure (boîtier, portable, alimentation) a été monté à environ deux mètres du piquet le plus proche, derrière la sphère. L'émetteur a été placé dans l'alignement de façon à ce que le premier piquet soit à 10 cm de son bord. Le repère a été placé à un mètre environ de l'émetteur et du plus proche piquet. Cinq séries de mesures ont été faites, avec à chaque fois un angle différent (respectivement 30°, 0°, -30°, -45°, 45°) entre l'axe X+ de l'émetteur et l'alignement de piquets.

Fig. 1 : Dispositif expérimental



Pour chaque série, le même opérateur pointe successivement au centre de la moelle de chaque piquet. L'opération a été répétée 10 fois par série. Le diamètre de la moelle n'excède pas 1,5 mm, et la manipulation a été faite avec autant de soin possible. L'erreur de visée de l'expérimentateur est inférieure au millimètre. Les mesures de distances entre piquets, ainsi que le positionnement des angles ont été réalisés avec un décimètre. La précision de ce positionnement est modeste (de l'ordre du centimètre ou de 5°). Soulignons que l'objectif n'est pas de comparer une mesure (les coordonnées) à une valeur théorique (la position réelle du point visé) mais de comparer la variabilité d'une mesure en différentes zones du champ magnétique émis. On a donc pas besoin de connaître la position précise de points visés, tant qu'elle est fixe.

➤ Traitement des données

Au total, 50 positions (5 angles × 10 distance) ont été obtenues, avec à chaque fois 10 répétitions. Chaque mesure est un triplet de coordonnées (X,Y,Z) donné avec une précision de 0.01 cm dans le repère défini à l'initialisation. La variance de chaque coordonnée dans chaque position a été calculée sous Excel. Etant donné le protocole de mesure (quadrillage d'un secteur du plan), il a paru préférable de se limiter à l'étude de la variabilité en X et Y. La variance de la mesure a donc été évaluée comme la somme des variances de X et de Y.

➤ Résultats et conclusions

Les résultats sont présentés sur la figure 2. L'écart type de la mesure en cm est représenté sur une échelle logarithmique en fonction de la distance à l'émetteur pour chaque série. La meilleure précision correspond à un écart type de 0.01 cm, à 50 cm de l'émetteur. Entre 25cm et 2m, l'écart type est inférieur au mm. Les mesures prises à 10 cm montrent toujours une variance beaucoup plus forte (écart type de l'ordre du cm et

plus). Au delà de 2 mètre l'écart type augmente brusquement, jusqu'à être de l'ordre du demi centimètre à 4 mètres. Les différentes séries montrent que la précision n'est pas la même sous tous les angles : la série -30° semble en particulier plus précise que les autres.

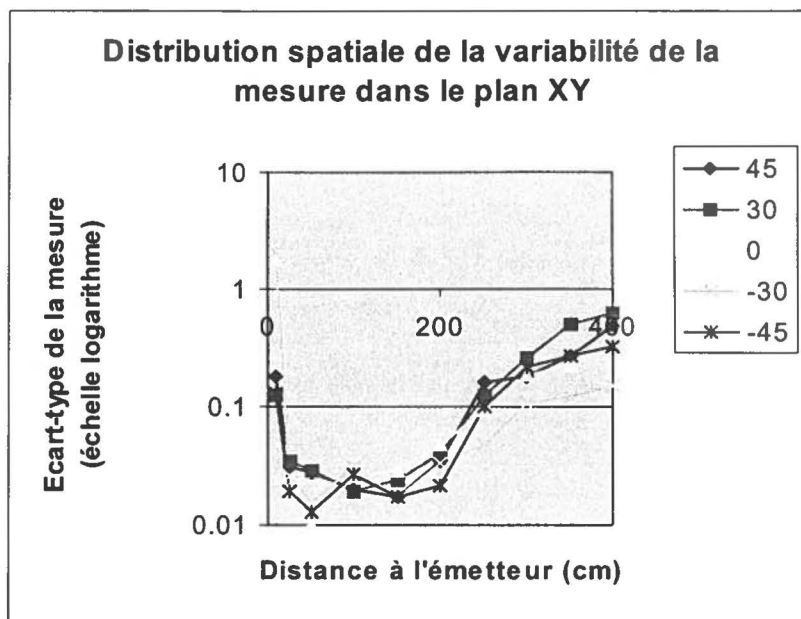
Deux consignes semblent se dégager :

- Si on a besoin de travailler avec la précision maximale (en particulier, pour saisir la position du repère), il faut se situer à moins de deux mètres de l'émetteur. La précision est alors inférieure au millimètre.
- Il faut éviter de travailler à moins de 25 cm de la sphère.

En outre, il faut garder à l'esprit que l'erreur de mesure réelle inclut d'autres termes :

- la variation réelle de la position de la cible dans un repère extérieur (non-négligeable pour une plante). Ce n'est pas la peine de se soucier de la zone de travail si il y a du vent !
- l'erreur de visée, qui peut être importante pour une cible peu accessible.
- éventuellement, une autre composante de l'erreur de visée liée à l'imprécision du lieu pointé (d'un point de vue pratique, la base d'un rameau ressemble plus à un cercle qu'à un point...).
- le biais de la mesure, c'est à dire la différence entre la valeur théorique de la mesure et la valeur moyenne mesurée.

Fig. 2 : Résultats



Annexe 5 : Inertie de structure d'un tronçon d'axe

Les méthodes classiques de mesure de module d'élasticité sur des tronçons d'axe se basent en général sur l'hypothèse de constance de la section le long du tronçon. Du fait de l'hétérogénéité du matériel végétal, celle-ci n'est en général pas strictement vérifiée. La détermination du module se base donc sur une valeur de l'inertie « de structure », dont on suppose qu'elle intègre les variations effectives de l'inertie le long du tronçon. Ce paragraphe s'attache à raisonner la méthode d'évaluation de cette inertie de structure.

Pour la déterminer, il faut tenir compte de l'hétérogénéité transverse et longitudinale. Pour déterminer l'inertie en un point donné, nous avons mesuré le diamètre D_V dans le plan de flexion et le diamètre D_H qui lui est perpendiculaire. Si on assimile la section à une ellipse, l'inertie en flexion vaut $(\pi/64)(D_V^3 \cdot D_H)$. Pour tenir compte des variations longitudinales du diamètre, il faut mesurer les diamètres à différents niveaux du tronçon. Deux questions se posent alors :

- combien de diamètres faut-il mesurer pour avoir un bon compromis entre la fiabilité du résultats et le temps consacré à la mesure ?
- comment combiner les valeurs mesurées pour calculer l'inertie de structure ?

Une mise au point méthodologique a été menée sur nos échantillons afin de répondre à ces deux questions sur la base de données objectives.

➤ Matériel et méthodes

Nous avons utilisé 22 tronçons provenant des axes suivis en 1999. Les tronçons proviennent des trois variétés et sont longs de 30 cm. Le diamètre du tronçon a été relevé dans les deux directions au niveau de $n=7$ points équidistants des tronçons, (une mesure à chaque extrémité et une tous les 5 cm). Trois méthodes distinctes ont été utilisées pour calculer l'inertie de structure à partir de n couples de diamètres (D_V^i, D_H^i) :

A : calculer les moyennes des diamètres puis calculer l'inertie à partir de ces valeurs :

$$I^A = (\pi/64)(\Sigma D_V^i/n)^3(\Sigma D_H^i/n)$$

B : calculer l'inertie en chaque point, puis en calculer la moyenne :

$$I^B = (\pi/64)(\Sigma D_V^i{}^3 D_H^i/n)$$

C : calculer l'inertie en intégrant le long du tronçon. Pour cela, nous avons considéré que l'axe est constitué d'un assemblage de $n-1$ troncs de cône. L'inertie moyenne d'un tronc de cône dont les extrémités sont caractérisées par les diamètres d_0 et d_1 , calculée par intégration, vaut :

$$I(d_0, d_1) = (\pi/64)(d_0^4 + d_0 d_1 + d_0^3 d_1 + d_0^2 d_1^2 + d_0 d_1^3 + d_1^4)$$

L'inertie de structure du tronçon vaut alors :

$$I^C = \Sigma I(D^i, D^{i+1}) / (n-1)$$

La méthode C est la plus rigoureuse pour calculer l'inertie moyenne le long du tronçon. La méthode B présente l'inconvénient de donner un poids identique aux mesures faites aux extrémités et à celles faites au milieu du segment. La méthode A est la plus simple, mais aussi la plus approximative : l'inertie étant une fonction fortement convexe du diamètre, l'inertie du diamètre moyen n'est pas égale à la moyenne des inerties.

Pour chaque tronçon, on a calculé l'inertie avec ces trois méthodes à partir des 7 points de mesure. Ensuite, nous avons dégradé l'information en ne considérant que 4 points de mesure, et calculé l'inertie par les 3 méthodes à partir de ces valeurs. La même chose a été faite en réduisant à 3, puis à 2 le nombre de points de mesure pris en compte.

➤ Résultats et conclusions

Au final, nous avons pour chaque tronçon 12 estimations différentes de l'inertie, selon et la méthode de calcul (A, B ou C) et le nombre de points considéré (2, 3, 4 ou 7). La méthode C7 a été prise comme méthode de référence pour juger de l'erreur que font les autres méthodes. Pour chaque méthode et chaque tronçon, on a calculé l'écart relatif à la méthode de référence. Finalement, on a déterminé pour chaque méthode :

- le biais, calculé comme la moyenne des écarts relatifs à la méthode de référence (en %)
- la précision, calculée comme l'écart type relatif à la méthode de référence (en %)

Le tableau suivant rapportent les résultats moyens sur les 22 tronçons :

Biais	7	4	3	2	Précision	7	4	3	2
C	(0)	-0.4	-0.2	1.4	C	(0)	3.1	7.7	14.1
B	2.3	2.7	2.9	6.3	B	4.7	7.6	12.4	20.6
A	-2.3	-2.3	-2.1	-1.0	A	4.2	5.3	8.2	12.1

Les valeurs de biais montrent que la méthode B génère une surévaluation systématique de l'inertie, de l'ordre de 2 à 3 % avec trois points ou plus et de 6% avec deux points. La méthode A génère une sous-évaluation systématique de 2% environ²⁷. La dégradation du nombre de points avec la méthode C implique un biais négligeable. Pour les trois méthodes, la dégradation du nombre de points de mesure implique une perte importante de précision. La méthode B est la moins précise et la plus biaisée quelque soit le nombre de points. La méthode A, bien qu'approximative, s'avère être la meilleure méthode avec deux points de mesure.

Finalement, nous avons choisi d'utiliser la méthode C3, qui est très peu biaisée et offre une précision intéressante pour seulement trois points de mesure.

➤ Note critique

Pour sélectionner une méthode, le critère que nous avons choisi est la concordance avec la valeur « réelle » de l'inertie moyenne, c'est-à-dire celle qu'on trouverait en faisant un très grand nombre de mesures de diamètre uniformément réparties le long du tronçon. Pour un tronçon de longueur L dont le diamètre en tout point s est donné par une fonction $D(s)$ quelconque, cette valeur est donnée par :

$$I = (\pi/64) \int_0^L D^4(s) ds .$$

Ce critère, s'il paraît satisfaisant du point de vue mathématique, mérite d'être remis en cause d'un point de vue mécanique. En effet, la variable mesurée lors d'un essai de flexion est le déplacement du milieu de l'échantillon. Or ce déplacement est proportionnel, non à l'inertie elle-même, mais à son l'inverse. Ce point découle directement de la formule de base de la théorie des poutres : $C=M/EI$. En conséquence, dans le cas où cette inertie est hétérogène le long de l'axe, le déplacement total est plus sensible aux faibles valeurs d'inertie qu'aux valeurs fortes. Ce point se comprend aisément en considérant une poutre très rigide dont le diamètre est constant sauf dans une très courte portion, pour laquelle le diamètre est nettement inférieur : lors d'une flexion, la prise de courbure de fait surtout au niveau de cette zone et le déplacement total dépend donc surtout de la valeur au niveau de cette zone. Pour une poutre d'inertie très hétérogène, c'est la valeur minimale de diamètre qui est la plus importante. Le méthode qui consiste à moyenner l'inertie locale le long du tronçon donne, inversement, plus d'importance aux zone de diamètre

²⁷ le fait que ce biais diminue quand on utilise moins de points est probablement dû à des compensations d'erreurs

maximal. Pour tenir compte de ce fait, la valeur de référence de l'inertie moyenne devrait être donnée

par :
$$I = \frac{1}{(\pi/64) \int_a^b \frac{1}{D^4(s)} ds}.$$

Si les diamètres varient peu le long du tronçon, les conséquences de ce fait sont mineures (pour un tronçon dont les diamètres extrémaux sont 1.1 et 0.9, la première méthode surévalue l'inertie de 2% environ par rapport à la première).

Annexe 6 : Prise en compte de la conicité dans les flexions 3 pts

➤ Formule de Cannell et Morgan (Cannell et Morgan 1987)

Le tronçon est supposé conique, de rayons R_A et R_B à ses extrémités ($R_B > R_A$). Soient L la distance séparant les appuis, P le poids appliqué au milieu, δ le déplacement du milieu du tronçon.

L'inertie en flexion du tronçon à son extrémité fine vaut : $I_A = \pi R_A^4 / 4$

La conicité est caractérisée par le paramètre : $K = (R_B - R_A) / R_A L$

La position s de la déflexion maximale par rapport à l'extrémité fine est donnée par (Cannell et Morgan 1987) :

$$s = \frac{L}{1 + (R_A / R_B)^{1/3}}$$

Le module d'élasticité, en tenant compte de la conicité est alors donné par (Cannell et Morgan 1987) :

$$E_K = \frac{PL^3}{48I_A \delta} \left[\frac{2s^2}{L^2} \left(\frac{3 + Ks}{(1 + Ks)^3} \right) - \frac{1}{2(1 + KL/2)^2} \right] \quad (1)$$

➤ Expression du facteur de correction

Rappelons que, pour un tronçon droit, le module est donné par : $E_0 = \frac{PL^3}{48I\delta}$

où I désigne d'inertie en flexion du tronçon, que nous supposons égale à celle en son milieu :

$$I = \pi(R_A + R_B)^4 / 64$$

Nous allons exprimer le facteur de correction $C = E_K / E_0$ à appliquer au module déterminé par cette formule classique, en fonction du rapport des diamètres du tronçon : $r = R_B / R_A$.

$$C = E_K / E_0 = \frac{I}{I_A} \left[\frac{2s^2}{L^2} \left(\frac{3 + Ks}{(1 + Ks)^3} \right) - \frac{1}{2(1 + KL/2)^2} \right] \quad (2)$$

I s'exprime en fonction de I_A et r : $I = I_A \left(\frac{1+r}{2} \right)^4$ et K en fonction de r et L : $K = \frac{r-1}{L}$

En introduisant : $\gamma = Ks = \frac{r-1}{1+r^{-1/3}}$ et en notant que : $\frac{s}{L} = \frac{1}{1+r^{-1/3}} = \frac{\gamma}{r-1}$

L'équation (2) s'écrit indépendamment de L :

$$C = \left(\frac{1+r}{2} \right)^4 \left[\frac{2}{(1+r^{-1/3})^2} \left(\frac{3+\gamma}{(1+\gamma)^3} \right) - \frac{2}{(r+1)^2} \right]$$

On vérifie que pour $r = 1$, $\gamma = 0$ et $C = 1$.

➤ Application numérique

La fonction $C(r)$ est représentée sur la figure 1. La correction à appliquer est proche du rapport des diamètres quand celui-ci est inférieur à 2. L'utilisation de la formule relative au cas cylindrique amène donc à une sous-évaluation importante de l'élasticité dès que l'échantillon est significativement conique.

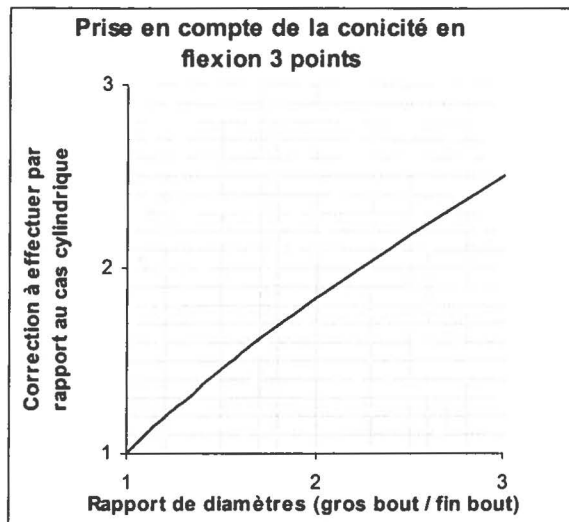


Figure 1

➤ **Discordance avec les valeurs tabulées de (Young 1989)**

L'ouvrage (pages 101, 182 et 192) donne le facteur de correction à appliquer pour avoir la déflexion au milieu d'une poutre (d'inerties aux extrémités I_A et I_B) à partir de la déflexion calculée pour une poutre sans défilement d'inertie I_A . Il est donc équivalent au terme :

$$\left[\frac{2s^2}{L^2} \left(\frac{3 + Ks}{(1 + Ks)^3} \right) - \frac{1}{2(1 + KL/2)^2} \right]$$

de l'équation (1) donnée par Cannell et Morgan. Ce facteur est tabulé pour différentes valeurs du rapport I_B/I_A . La correction directe à appliquer quand le calcul est fait à partir de l'inertie au milieu du tronçon s'obtient en multipliant ce facteur par $((1+r)/2)^4$.

Le tableau 1 rapporte, pour différents rapports d'inertie, la conicité équivalente, les corrections brutes données par chacun des auteurs, et les corrections directes équivalentes. Les résultats sont en profond désaccord : Young donne une correction négligeable alors que Morgan donne une correction qui peut être importante sur un tronçon réel.

		Correction brute		Correction directe	
I_B/I_A	K	Young	Morgan	Young	Morgan
2	1.189	0.702	0.823	1.007	1.182
4	1.414	0.485	0.651	1.030	1.382
8	1.682	0.331	0.495	1.070	1.600

Tableau 1

Renseignement pris, il semble que l'erreur vienne de l'expression fournie par Cannell et Morgan. Le facteur de correction calculé vaut (J. Gril, com. pers.) :

$$C = 1 + \left(\frac{r-1}{2} \right)^2 / r$$

Ce qui est en accord avec les résultats de Young.

Annexe 7 : Protocole de coloration Bleu Astra / Safranine

La coloration permet de mettre en évidence sur une section ligneuse les zones de bois de tension à fibre G. A partir d'une coupe mince :

- Décolorer les coupes pendant 10 minutes en les trempant dans de l'eau de Javel (NaClO).
- Stopper l'action de la Javel rinçant à l'eau, puis en immergeant dans de l'acide acétique. (10 min.)
- Rincer à l'eau distillée
- Déshydrater les coupes en les trempant dans des bains d'éthanol de concentration croissante :
 - 10 min. dans de l'éthanol à 30°
 - 10 min. dans de l'éthanol à 70°
- Colorer pendant 10 min. dans la Safranine.
- Tremper les ensuite dans de l'éthanol 100° pendant 10 min. afin d'éliminer le surplus de couleur.
- Colorer pendant 10 min. au Bleu Astra.
- Tremper ensuite dans de l'éthanol 100° afin d'éliminer le surplus de couleur (10 min. maximum).

Les zones de bois de tension sont colorées en bleu par le Bleu Astra, et les zones riches en lignines sont colorées en rouge par la safranine.

Annexe 8 : Calcul des DLM en fonction des DRLM

Soit une section homogène de rayon R_1 , de surface $S_1 = \pi R_1^2$ et d'inertie $I_1 = \pi R_1^4/4$. Sous l'effet de la croissance diamétrale, la section met en place une nouvelle couche d'épaisseur ΔR dont nous supposons qu'elle a le même module d'élasticité que la section elle-même. Le nouveau rayon de la section vaut $R_2 = R_1 + \Delta R$. S_2 et I_2 sont la surface et l'inertie de la section après croissance. Supposons que la nouvelle couche est le siège de déformations de maturation dont l'intensité dépend linéairement de la distance z à l'axe neutre de la section (déformations planes). Soit α_{BT} la valeur des DLM en haut de la section et α_{BN} leur valeur en bas de la section (figure ci-dessous). Dans la nouvelle couche, les déformations de maturation valent :

$$\alpha_0(z) = \alpha_0 + z\beta_0, \quad \text{avec : } \alpha_0 = (\alpha_{BT} + \alpha_{BN})/2, \quad \beta_0 = (\alpha_{BT} - \alpha_{BN})/2R_2$$

Virtuellement, ces déformations se traduisent par une compression α_0 et une variation de courbure β_0 dans la nouvelle couche. En réalité, ces déformations sont pour partie bloquées à cause de la solidarité avec les couches inférieures. Sous hypothèse de section homogène, on montre aisément que la part de déformation qui s'exprime est égale à la participation de la nouvelle couche à l'inertie de la section selon chaque mode de déformation. La déformation effective en tout point est donc : $\alpha'(z) = \alpha' + z\beta'$, avec

$$\alpha' = \alpha_0 \Delta S/S_2, \quad \beta' = \beta_0 \Delta I/I_2$$

La déformation résiduelle vaut donc, en tout point de la nouvelle couche :

$$\begin{aligned} \alpha^{\text{res}}(z) &= (\alpha_0 - \alpha') + z(\beta_0 - \beta') = \alpha_0(1 - \Delta S/S_2) + z\beta_0(1 - \Delta I/I_2) \\ &= \alpha_0 S_1/S_2 + z\beta_0 I_1/I_2 = \alpha_0 \rho^2 + z\beta_0 \rho^4 \quad \text{avec } \rho = R_1/R_2. \end{aligned}$$

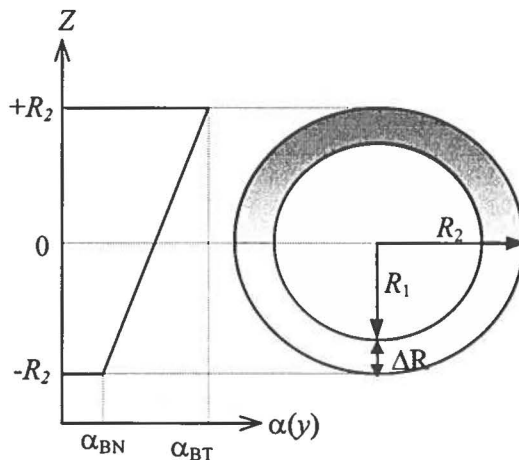
Soit, au niveau de la face supérieure :

$$\alpha^+ = \alpha^{\text{res}}(R_2) = \alpha_0 \rho^2 + R_2 \beta_0 \rho^4 = \frac{1}{2} \alpha_{BT} (\rho^2 + \rho^4) + \frac{1}{2} \alpha_{BN} (\rho^2 - \rho^4)$$

au niveau de la face inférieure :

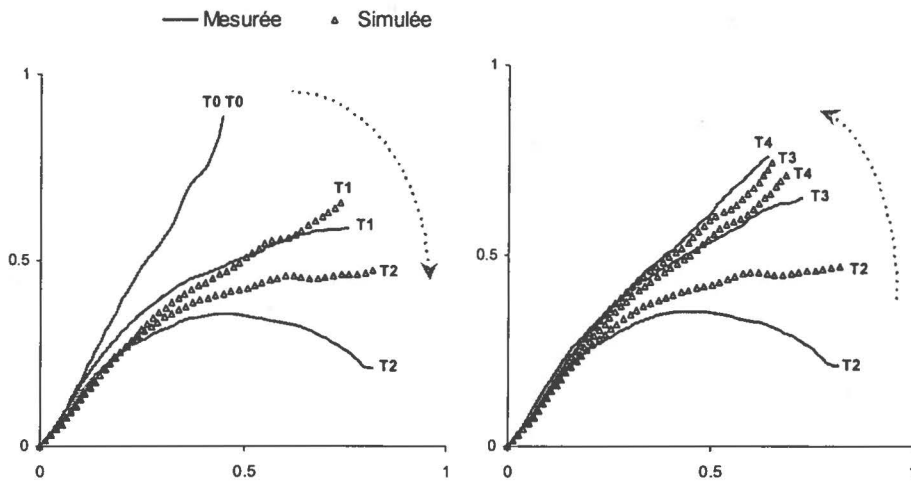
$$\alpha^- = \alpha^{\text{res}}(-R_2) = \alpha_0 S_1/S_2 - R_2 \beta_0 I_1/I_2 = \frac{1}{2} \alpha_{BT} (\rho^2 - \rho^4) + \frac{1}{2} \alpha_{BN} (\rho^2 + \rho^4)$$

Ces équations quantifient la valeur de DRLM (α^+, α^-) en fonction des DLM (α_{BT}, α_{BN}). En les inversant, on obtient les DLM en fonction de DRLM. On vérifie aisément que quand ρ est proche de 1, les DRLM et les DLM sont équivalentes. On vérifie aussi que le différentiel mesuré est proportionnel au différentiel réel : $\alpha^+ - \alpha^- = \rho^4 (\alpha_{BT} - \alpha_{BN})$

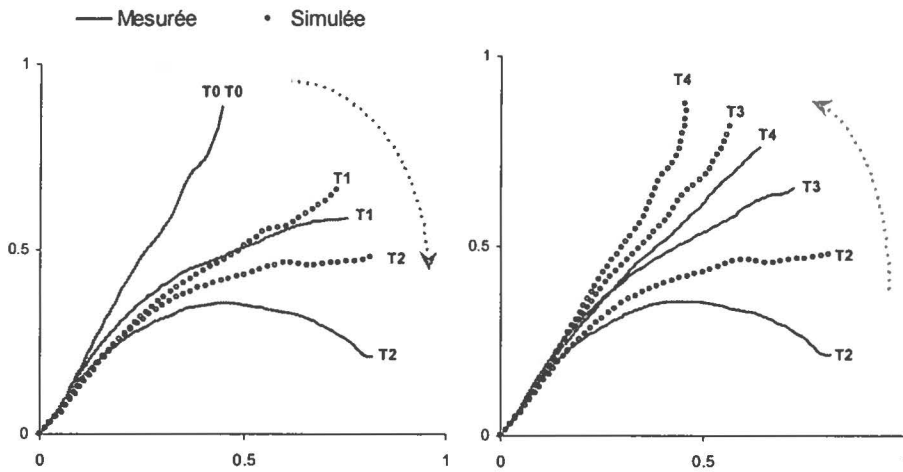


Annexe 9 : Compléments de résultats de simulations

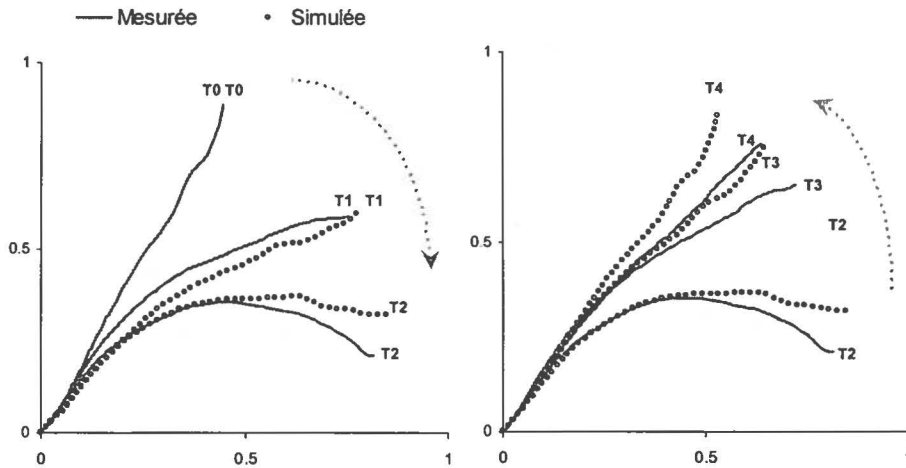
Evolution de la forme de l'axe "L21" avec : $E=4445 \text{ MPa}$
sans maturation



Evolution de la forme de l'axe "L21" avec : $E=3500 \text{ MPa}$
DLM uniforme ($3000 \mu\text{def}$)

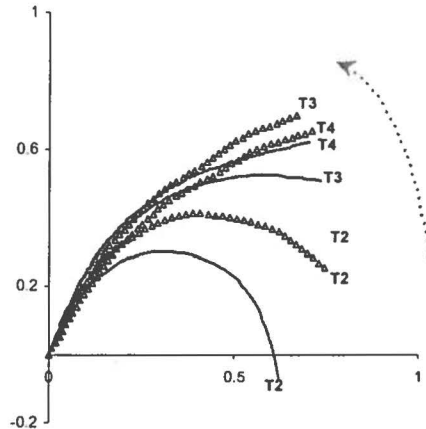
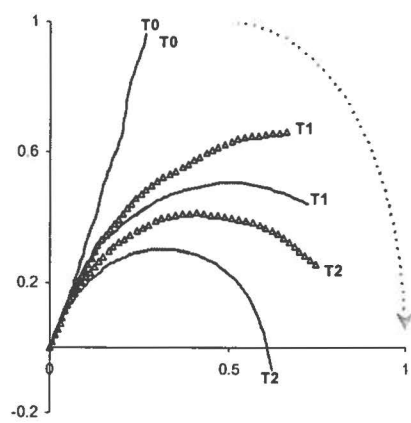


Evolution de la forme de l'axe "L21" avec : $E=3500 \text{ MPa}$
DLM uniforme ($3000 \mu\text{def}$)
délais de maturation : 3 semaines



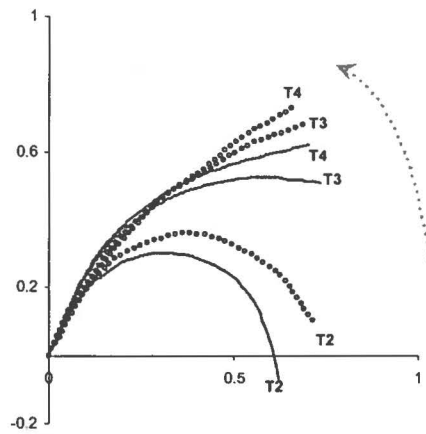
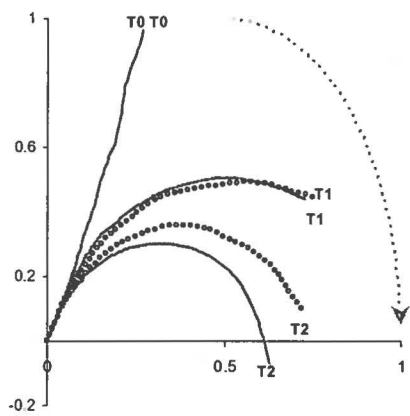
Evolution de la forme de l'axe "M40"

— Mesurée
 ▲ Simulée avec : $E=4887 \text{ MPa}$
 sans maturation



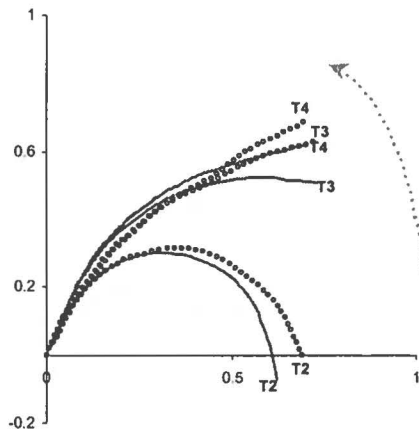
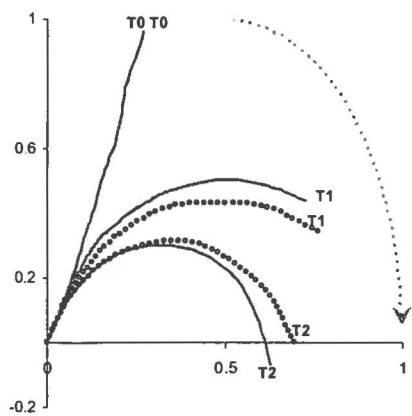
Evolution de la forme de l'axe "M40"

— Mesurée
 • Simulée avec : $E=3500 \text{ MPa}$
 DLM uniforme ($4000 \mu\text{def}$)



Evolution de la forme de l'axe "M40"

— Mesurée
 • Simulée avec : $E=3500 \text{ MPa}$
 DLM uniforme ($3000 \mu\text{def}$)
 délais de maturation : 3 semaines



Annexe 10 : Publication dans “Trees, Structure and Function”

Bending of apricot-tree branches under the weight of axillary productions: confrontation of a mechanical model to experimental data

T. Alméras, J. Gril, E. Costes

(soumise à publication à la revue "Trees, structure and function" en 02/2001)

Abstract

Stem orientation is an important factor for fruit trees growth and branching habit since it influences fruit production as well as training practices. A mechanical model of the bending of a stem under axillary load was written and evaluated using experimental data on Apricot-tree (*Prunus armeniaca L.*). A set of 15 one-year-old stems of various shapes was observed during the early stage of the growing season when the radial growth is still negligible and the loading of the stem increases considerably. The structural modulus of elasticity of the stems was estimated through *in-situ* bending tests based on the assumption of homogeneous material behaviour. The effect of viscoelasticity was observed through creep tests performed on similar stems during winter. Inputs of the model are initial shape, initial diameter and final load, defined at various positions along the stem. The final shape was simulated based on different mechanical assumptions, and compared to observations. Assuming small deflections resulted in an underestimation of the mean slope variation of 48%; accounting for large displacements reduced it to 29% and accounting for viscoelasticity to 14%. An adjustment of the structural modulus of elasticity to fit the final shape led to excellent fitting in most cases, the residual errors for some axes being attributed to material heterogeneity. The use of biomechanical models to predict the shape of a fruit trees based on growth parameters, provided the adequate assumptions are made, is then discussed.

Key words : *Prunus Armeniaca* / Biomechanics / Model evaluation / Viscoelasticity / Large deflexions

Introduction

Woody species exhibit a large architectural diversity. Form and orientation of stems are important factors of this diversity and interact with growth and ramification (Smith and Wareing 1964; Wareing and Nasr 1961). In the case of fruit trees, it has been established that they have a qualitative and quantitative impact on the production (Lakhoua and Crabbe 1975; Lauri et al. 1997; Lichou et al. 1997), while in forestry context trunk form is an essential criterion of quality, and much work has been dedicated to its survey (Kozłowski 1971; Thomas 2000; Timell 1986).

The form establishment of a woody stem is initiated during its elongation by the direction of apex growth (Fisher and Stevenson 1981). This primary direction is modified by the combined effect of three phenomena: bending resulting from the additional self weight of stems and axillary loads, stem rigidification resulting from radial growth, secondary reorientation associated with wood maturation (Archer 1986). Fournier and collaborators (Fournier et al. 1991a; Fournier et al. 1991b) clarified the application of mechanical principles to the calculation of the deformation of a growing stem. These works underlined the importance of the relative dynamics of stem loading and rigidification, distinguishing “short-term” loading such as wind or snow from “long-term” loading resulting from progressive weight increase of the tree parts. Qualitative validations of the concepts used in the models have been proposed (Castera and Morlier 1991). A confrontation between a mechanical model and experimental data has been achieved in the context of biomechanics of regulation (Fournier et al. 1994); however, this study focused on the regulation of the form of the stem, and did not take into account the actual dynamics of growth. Moreover, most of the work on biomechanical modelling of the form of woody stems has been achieved on forest species, focusing on the form evolution and stress distribution of trunks of adult trees. In this context, the time unit is the annual growth ring (Fourcaud and Lac 1996; Fournier et al. 1991a) and the effect of intra-year dynamics of loading and rigidification has usually been disregarded.

The present study is part of a project aiming at modelling the form development of one-year-old apricot-tree stems. The aerial architecture of apricot-tree has been studied previously in detail by Costes (Costes 1993). It presents a large diversity of forms which apparently results, at least for a part, from the bending of the long branches. The flowering of the apricot-tree is located on one-year-old stems; and blooming precedes the vegetative bud break. Follows a first stage of fruit growth and development of leafy shoots (Costes et al. 1995; Lichou and Audubert 1989). The radial growth (i.e., the increase of stem thickness) starts only later in the season (Costes et al. 2000). During the period preceding radial growth, the one-year-old stems are submitted to large load increments. This period aroused our interest for several reasons: it is a case where the intra-year growth dynamic cannot be disregarded; the delay between weight increase and radial growth allows a simplified mechanical formulation where the quantity of matter constituting the holding structure can be considered as roughly constant; the large amount of loading implies easily measurable deflections; the bending takes place within a relatively long period that allows to test the implication of a viscoelastic behaviour of the material (Gril and Fournier 1993).

The survey presented here aims at evaluating, from data measured on one-year-old apricot-tree stems, a mechanical model predicting the amount of bending during a period with no radial growth. The analysis used will have much in common with that applied by other authors to the modelling of wind loading of tree trunks (Milne and Blackburn 1989; Morgan and Cannell 1987; West et al. 1989), since they do not have either to consider any change of stem thickness during the loading. Mechanical model of stem bending

Basic model assuming small perturbations

Bending simulation is based on a curvilinear beam bending theory with perfect embedment at one end (Timoshenko 1953). The problem is solved in two dimensions: the stem is supposed to remain in a vertical plane. It is divided in n beam elements. The geometry of the element i in the initial state is described by its diameter D_i , its length L_i , and its curvature C_i^{ini} . All elements are made of the same homogeneous elastic material, characterised by its modulus of elasticity (MOE) denoted E and density ρ . The angle between the horizontal direction and the tangent at the embedment is written Φ_0 .

In the initial equilibrium, the element i is submitted to the loading due to the self-weight of the stem. The bending will be caused by additional loads defined by their mass m_i' for each element i . We will neglect the fact that the centre of mass of the axillary productions may be significantly distinct from their point of application, and consider that all their mass is concentrated at their basis. This approximation will be discussed subsequently.

The deformation of the element i results in a variation of curvature:

$$\Delta C_i = \Delta M_i / EI_i \quad (1)$$

where ΔM_i is the bending moment applied on the element i by the increment of weight of the downward stem portion. Let x_i be the position of the end of the element i in the absolute co-ordinate system (O, X, Z), x_i^{dw} and m_i^{dw} the position and mass, respectively, of the centre of mass of the downward stem portion (figure 1). The total mass of the element i , including the self-weight and the loading, is:

$$m_i = m_i' + \pi \rho L_i D_i^2 / 4$$

The bending moment applied to the element i is:

$$M_i = (x_i^{dw} - x_i) g m_i^{dw}$$

where g is the gravity constant. The mass of the portion downward from $i-1$ is:

$$m_{i-1}^{dw} = m_i^{dw} + m_i$$

The position of its centre of mass is:

$$x_{i-1}^{dw} = (m_i^{dw} x_i^{dw} + m_i x_i) / m_{i-1}^{dw}$$

The recurrent application of these formulas along the stem axis, from the apex toward the insertion, allows to calculate the bending moment applied to each segment in a given geometrical configuration (Blaise et al. 1992).

However, the deformation derived from equation 1 corresponds to an equilibrium solution only if the moment ΔM is calculated in the final configuration. In the case where the small deflection assumption (SDA) is valid, the change of bending moment induced by the deformation can be neglected: the moment calculated in the final configuration can be approximated by that calculated in the initial configuration (figure 2.1). The deformed configuration of every element can then be given by the new curvature:

$$C_i = C_i^{ini} + \Delta M_i / EI_i$$

The length (assumed unchanged) and new curvature of all elements allow to rebuild the whole form of the stem. If Φ_i is the angle of the segment i , the angle of the segment $i+1$ becomes:

$$\Phi_{i+1} = \Phi_i + C_i L_i$$

The position of its extremity is given by:

$$x_{i+1} = x_i + L_i \cos(\Phi_{i+1})$$

$$z_{i+1} = z_i + L_i \sin(\Phi_{i+1})$$

The position of all segments of the stem can be calculated by the recurrent application of these formulas from the stem insertion toward the apex.

Accounting for large displacements

In the case of large displacements, the deformation calculated with the SDA is not a valid approximation of the solution. Indeed, since the bending moments depend on the lever arm of the loads, they vary strongly during the deformation (figure 2.2); the solution is no longer compatible with requirements of static equilibrium. To take this phenomenon into account, bending moments must be recalculated in the deformed configuration, and a new stem form derived again from the deformations associated with the new moments. The operation is repeated until the difference of form is lower than a given threshold. In other words, a correct solution verifying both conditions of static equilibrium and kinematic relations has been reached as soon as it remains practically unchanged by a cycle of bending moments recalculation (from apex to insertion) followed by form reconstruction (from insertion to apex). This iterative resolution of the problem can be subjected to problems of convergence, solved by the introduction of a damping factor (Craig 1989).

The method of Morgan and Canell (Morgan and Cannell 1987), based on the use of a transport matrix, differs essentially from ours by the ordering of operations, as they recalculate the moments together with the shape reconstruction. As soon as a stable form has been reached both methods should lead to the same solution. West et al. (West et al. 1989) have proposed an alternative approach with an integro-differential equation technique based on the same physical principle, but they did not apply it to conditions requiring the consideration of large displacements. None of these models accounted for an initial geometry differing from a straight line, as is allowed in the present formulation.

The calculations were easily performed with the help of spreadsheets of the calculator Microsoft Excel97® associated to Microsoft Visual Basic® commands. The stem structure is constituted of 50 elements. Large

displacements calculations have been validated by confrontation with well-known analytical solutions of elastic buckling (Timoshenko 1966).

A procedure of structural MOE adjustment has been integrated to the model. It determines the value of MOE minimising the distance between the simulated final configuration and a target configuration. The distance used is the sum of squares of distances between the points of the stem (least square criterion).

Accounting for viscoelasticity

Wood material has a viscoelastic behaviour (Kollmann and Côté 1968). As a result, the deformations provoked by a given loading vary with time. To take this phenomenon into account, it is necessary to know the temporal evolution of the material properties, characterised here by a time-dependent MOE $E(t)$. The deformation at time t_1 of an element submitted to the bending moment ΔM since time t_0 becomes:

$$\Delta C(t_1) = \Delta M / E(t_1-t_0)I$$

The deformation at time t_1 is equivalent to the instantaneous deformation of an elastic material whose MOE is $E(t_1-t_0)$.

Since the time is not an explicit parameter of our model, the viscoelasticity will be taken into account through the use of an equivalent structural MOE at the final date. The calculation of this modulus considers the dynamics of the loading as well as the $E(t)$ law, and is based on the principle of superposition (Lemaitre and Chaboche 1985). Let a beam element of inertia I be submitted at successive dates $t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_f$ to permanent loadings characterised by their bending moments $\Delta M_1, \Delta M_2, \dots, \Delta M_k, \dots, \Delta M_f$. At time t_f , the curvature increase caused by the load added at time t_k is:

$$\Delta C_k(t_f) = \Delta M_k / E(t_f-t_k)I$$

The increment of curvature caused by the cumulation of all loads is:

$$\Delta C(t_f) = \Sigma(\Delta C_k(t_f)) = \Sigma(\Delta M_k / E(t_f-t_k)I)$$

The equivalent MOE at time t_f is:

$$E^{eq} = \Delta M / I\Delta C(t_f)$$

where $\Delta M = \Sigma(\Delta M_k)$ is the total bending moment imposed to the element.

The equivalent MOE finally becomes:

$$E^{eq} = \Delta M / \Sigma(\Delta M_k / E(t_f-t_k)) \quad (2)$$

Material and methods

Material

In order to check the model based on a large range of morphology, three varieties of apricot-tree (*Prunus armeniaca*) of contrasted bearings have been chosen for the survey. 'Lambertin' has an erected bearing, 'Modesto' a erected bearing that opens up during growth, 'Palsteyn' a weeping bearing (Lichou and Audubert 1989). The trees were planted in 1993 in the experimental orchard of the Fruit Arboriculture Laboratory of INRA (Montpellier, France). The trees had been grafted on seedlings rootstock 'Manicot'. The studied material comes from 6 'Lambertin' trees driven in Y, 8 'Modesto' trees driven in Y and 4 'Palsteyn' trees driven in goblet with 4 limbs. During the winter 1997/1998, the trees have been pruned to induce the development of long shoots.

In the beginning of 1999, 5 one-year-old stems of each variety have been selected for the follow-up of growth and bending. All are made of a single growth unit, 70 to 170 cm long, and carry no sylleptic branch. The stems were observed during 1999, which corresponded to their first year of fruit production and ramification. The ramification process leads to the apparition of axillary leafy shoots. Two types of shoots are usually distinguished. Short shoots originate from organs entirely pre-formed in the bud and practically do not elongate; their length does not exceed a few centimeters. Long shoots contain longer internodes and they continue their growth in neof ormation. Since apricot tree exhibits a sympodial ramification, the stem extension requires the action of a secondary bud. This bud is equivalent to any lateral bud of the stem, therefore, in our survey, the extension will not be distinguished from other axillary shoots. The presented follow-ups will be restricted to the period comprised between the flowering of the most precocious variety (week 7 of the year) and the fruit maturity of the most precocious variety (week 22 of the year).

During 1999, 20 stems and 150 fruits of each variety have been taken to establish relations between the morphology of the axillary productions and their mass. The chosen stems were similar to the sample used for growth observation. During winter 1999/2000, 3 other stems by variety, similar to those of the sample, have been used for the creep tests.

Record of loading history

The axillary productions associated with every node have been observed repeatedly during the survey: at bloom, 5-6 weeks after bloom, then every 2-3 weeks until fruit maturity. Three types of axillary production have been distinguished: fruits, short shoots and long shoots. The diameter of the biggest transverse dimension of the fruits has been measured. As most of the mass of the short shoots is made of the leaves, only the number of leaves was recorded. For the long shoots, the number of leaves, the base diameter and length of the shoot were recorded.

Since the survey was part of a follow-up involving the whole season, it was not possible to measure the mass of the organs directly. For every type of production and for every variety, allometric relations have been established to estimate the mass of the organs from the measured data. All axillary productions of the stems used for this purpose were observed in the same way as those of the follow-up, then weighed with a precision of 0.1 g. In a similar way, 30 fruits by variety were measured and weighted at 5 stages to establish the relation between the measurements and the mass of the organs. The relation between leaf number and mass of short shoots, between diameter and mass of fruits and between length, base diameter and mass of long shoots, were then established.

Record of diameter growth history

Just before flowering, the stems were marked every 5 cm with a Typex ring to ensure fixed measurement points during the whole study. At every point, the stem diameter was measured with an electronic caliper. These data were recorded at the same dates as the measurements on axillary productions. Considering the main role of the diameter data for the mechanical simulation, two precautions were taken. Once in the year we checked the circularity of the stem section by measuring the diameter in two perpendicular directions. At all other dates, the diameter was measured perpendicularly to the stem axis, with the direction of the handle in the vertical plane of the stem bending.

To characterise globally the radial growth of every stem, the mean diameter D_m was defined as the average of the diameters recorded at all measurement points. To characterise the stems mechanically, the mean inertia of a stem was defined as the inertia corresponding to the mean diameter: $I_m = \pi D_m^4 / 64$

Record of bending history

The position of every measurement point was recorded using a magnetic 3D digitizer Polhemus® (Polhemus 1993) and a data acquisition software (Adam et al. 2000). These measurements were done 1-2 weeks after flowering, then every 3-4 weeks until fruit maturity.

The measured co-ordinates were pre-treated. Various operations were performed for each scatter describing a given stem. (1) To ascertain the data reliability, the points were visualised and the real length of segments was compared to that derived from co-ordinates. (2) In view of the simplified in-plane mechanical calculations, the points were projected in the plane containing the vertical direction and the direction of the main axis of the scatter (figures 3.1 and 3.2); this plane explained about 98% of the variance of the scatters. (3) The points were translated and rotated so that the insertion basis of the stem corresponded with the origin of the co-ordinate stems, and the direction of the scatter with the X direction (figure 3.3).

The orientation of a stem axis was characterised globally by the mean slope, calculated as the average of the slope of the segments. The bending between two dates was characterized by the reduction of the mean slope, designated by "leaning".

Interpolation of the data

For practical reasons, like differences between varieties phenology or climatic constraints associated with in-field digitalisation, the various data could not be recorded simultaneously. To homogenise the data format, the measured values were sometimes completed by weekly values interpolated linearly between the dates of nearest measurement.

Besides, the geometric measurements were achieved every 5 cm along the stems whereas the bending model requires a 50 elements discretization. Consequently, the steps of discretization differed from those of model input; these were obtained by linear interpolation between the nearest points.

In-situ elastic bending test

The structural MOE of the stems was estimated in-situ by a bending test. The initial form of the stem was digitised, then a known weight was attached at a given position of the stem, and the form was digitised again about ten minutes later. The stem diameter was measured at various positions along the stem axis. This test was performed for every stem of the sample just before flowering with a weight of 185 g attached at the 3/4 of the total stem length.

A procedure of assessment of structural MOE was used to obtain a unique value of MOE, assuming that the stem is constituted of an homogeneous material. The value was determined through the use of the mechanical model, thus ensuring a correct accounting of large displacements.

In-situ creep bending test

During winter 1999/2000, an in-situ creep test was achieved on three stems by variety to evaluate the viscoelastic behaviour of the stems. The test was done in winter so that no growth influences the loading or the stem rigidity. The test was similar to that of instantaneous bending, except that after 10 minutes of loading and form recording, the stem was left loaded and the form was digitised 40 minutes, 3 hours, 24 hours, 5 days and 32 days after loading. The structural MOE was evaluated at each stage by large-displacements adjustment relative to the initial form before loading. From the values $E(t_1)$..., $E(t_n)$ obtained for the times $t_1 \dots t_n$, a law of time-dependent structural MOE $E(t)$ can be evaluated.

Results

The results concerning the dynamics of growth and bending, as well as the results of the simulations, have been established for all stems of the sample (5 by variety). They will be presented for the whole sample and illustrated for one typical stem by variety.

Growth dynamics

In the beginning of the season, the mean diameter of the stems was comprised between 5.3 and 8.9 mm; at week 22, between 5.5 and 12.9 mm. Figures 4.a,b,c show the evolution of the inertia for the three typical stems: clearly, the inertia increases very slowly at the beginning of the season. During the 10 weeks after flowering, the inertia increased by less than 25% in average for all stems. Afterwards, the growth became faster: the inertia increased in average by 117% between weeks 7 and 22. Table 1 gives the inertia at weeks 7 and 22 for all stems. For comparison, on the same stems, the inertia increased by an average of 600% during the whole year.

Axillary load

The observed stems reached the stage of full bloom by mid February (week 7) for 'Lambertin' and 'Palsteyn', end February (week 9) for 'Modesto'. The fecondation of the fruits takes place in the two next weeks. The fruits undergo then a first phase of weight growth, until the period of pit hardening, about forty days after flowering (Costes et al. 1995). The vegetative bud break took place for all varieties about two weeks after full bloom. On all stems, most nodes produced short shoots carrying 3 to 10 leaves. These shoots opened out their leaves in 2-3 weeks. On the five 'Modesto' and one 'Palsteyn' stem, one or two nodes produced long shoots that pursued their growth 4-5 weeks after bud break.

The relations between length and long shoot mass and between diameter and fruit mass were quantified by a power law $m = ad^b$, where m is the mass of the organ, d the measured dimension, a and b parameters to estimate. The parameters have been quantified by regression for every variety and every type of organ (non-presented data).

For every stem, the total loading was calculated at every date and is shown on figures 4.a,b,c for the three typical stems for the period considered. It increased until fruit maturity under the combined effect of shoot and fruit growth. At week 22, the fruit weight represented 50% of the total loading in average, that of short shoots 40% and that of long shoots 10%.

The mechanical modelling concerned a period comprised between weeks 7 and 17, during which the radial growth did not exceed 10% of the initial diameter. At week 17, the total load of the stems ranged between 64 and 386 g. Table 1 indicates the mass of axillary loads, as well as the mean inertia at this date for every stem. One 'Lambertin' and 2 'Modesto' did not carry any fruit at this date. The other stems carried 1 to 10 fruits. The length of long shoots did not exceed 25 cm at week 17.

Bending

Figures 5.a,b,c show the evolution of the mean slope of the three typical stems during the period. It decreased regularly from flowering to fruit maturity, up to a maximal leaning of 45° in average. In the period between weeks 7 and 17, the stems leaned by 30° in average. This means value hides important variations: the leaning at this date was comprised between 7° and 58°.

Mechanical properties of the stems

The structural MOE of every stem, E^0 , has been determined by adjustment from the data of instantaneous loading. The value for every stem is indicated in table 1.

The creep tests confirmed the existence of a viscoelastic behaviour. The bending of stems submitted to a constant load increased with time, as shown by figure 6. It corresponds to an apparent MOE decreasing with time, as shown by figure 7 where the measurement dates are represented in the X -axis with a logarithmic scale based on a time unit of 10 min. For every variety and at every date of measurement, the curves give the average for all three stems of the relative reduction in MOE, given by the ratio:

$$[E(t_0) - E(t)] / E(t_0)$$

where $E(t_0)$ is the structural MOE after 10 min. of loading. The curves were approached by a linear regression as follows:

$$E(t) = E(t_0) [1 - \alpha \log(t/t_0)]$$

The slope α characterises the degree of viscoelasticity of the material. The values of α and the coefficients of determination are indicated in figure 7.

These relations allow to calculate, for every stem, a time-dependent MOE $E(t)$, with $E(t_0)$ taken as the instantaneous MOE E^0 of the given stem. The equivalent modulus at week 17, E^{eq} , can be calculated using equation (2), for every stem, by taking into account the loading history. They are listed in table 1.

Making use of the mechanical model

For every stem, we calculated the bending predicted by the mechanical model during the period. The possible variation of embedment angle, resulting from movements of the holding branch, was taken into account. To achieve the calculation, the model requires:

- (1) global stem data: inclination of stem basis before and after bending, total stem length, material MOE and density;
- (2) for each 50 elements: curvature and diameter in the initial state, and attached load.

For every stem, initial state data (basis angle, total length, curvatures, diameters) have been specified from the measurements of week 7, and final state data (basis angle and loading) from those of week 17. Measured geometrical data at week 17 were used to evaluate the quality of the model.

For every stem, the calculations of deformation were achieved using three sets of assumptions:

- small displacements (SDA) and structural MOE E^0 ;
- large displacements and structural MOE E^0 ;
- large displacements and structural MOE E^{eq} taking into account the viscoelasticity

Figures 8.a,b,c, 9.a,b,c, and 10.a,b,c show the results of the simulations for the three typical stems. To facilitate the comparison between stems of different length, the scale of every graphic was normalised by the total length of the stem. Figures 11.1, 11.2 and 11.3 compare, for all stems, the simulated and observed leanings.

Discussion

Evaluation criteria of the models

We distinguished three levels to evaluate the models:

- The global level involves the whole sample. The errors detected at this level reveal a global insufficiency of the model, little dependent of the individual features of the stems. It can be assessed by comparing the average values of simulated and observed leanings, or, in a practically equivalent way, by comparing to 1 the slopes of the regression line obtained from these values (figure 11).
- The individual level concerns the simulation of every stem. The errors at this level result from specific features of some stems. They generate a bigger dispersion in the diagrams comparing the simulated and observed leanings, resulting in a lower coefficient of determination.
- The local level concerns the different parts of a given stem. The errors made at this level cannot be revealed by the comparison of simulated and observed leanings, which are, by definition, averaged over the whole stem. The global simulation of a given stem might well be of good quality, without the simulated form corresponding locally to the observed form. These effects can only be observed, for every stem, by comparing locally the simulated and observed forms, provided they are not masked by individual and global errors.

Inadequacy of SDA and necessity to account for large displacements

The comparison between the simulation made with and without SDA (figures 11.1 and 11.2) shows clearly the unsuitability of this assumption, in the case of young fruit tree stems. Leaning is globally underestimated by the model by 48% on average when assuming SDA. This underestimation is reduced to 29% when accounting for large displacements.

The effect of the SDA is however more complex than a systematic underestimation as can be seen by comparing figures 8 and 9: in case c-, leaning calculated with the simplifying assumption is superior to that calculated without. The effect of SDA actually depends not only on the magnitude of the deformation, but also on the initial stem orientation. The more vertical the stem, the greater the error. As a result, SDA not only leads to a global error on the mean of simulated leaning, but also to a higher dispersion of individual errors. This effect results in a lower coefficient of determination between observed and simulated leanings ($R^2=0.58$ with SDA vs. $R^2=0.66$ when accounting for large displacements).

Previous authors discussing the limit of validity of SDA usually disregard the influence of stem orientation. For instance, Milne and Blackburn (Milne and Blackburn 1989) consider that the endpoint deflection calculated under SDA should be lower than 25% of the stem length to ensure the applicability of SDA. This is only true, however, with respect to a loading acting transversally to the stem direction, as was the case in their work. The more axial the load, the less applicable becomes such a criterion. At the opposite extreme, when the load is close to axial and buckling occurs, the use of a large displacement formulation cannot be avoided although a SDA calculation would predict a negligible deflection.

Improvement through the accounting for viscoelasticity

In the model, the viscoelasticity has been taken into account indirectly through the calculation of an equivalent MOE at the final date. It results in an average MOE decrease of 15%. Leaning simulated with this corrected value remains underestimated on average in relation to the observed leaning, but by only 14% (to compare to the undervaluation of 29% obtained with the instantaneous structural MOE), which is a substantial improvement. The method used here considers globally the viscoelasticity of all stems of a variety, and does not permit to detect differences of behaviour between individuals. This explains why the coefficient of determination is not improved by this correction.

As a remark, this calculation disregards the viscoelastic effects associated with the variations of bending moment during the period. Only a calculation involving explicitly the time, with a recalculation at every step of the bending moments in the deformed configuration, would permit to take into account these second-order effects.

Possible origin of global and individual errors

The difference between the measured stem form and that simulated by the model, after accounting for large displacements and viscoelasticity, can be attributed to various causes, involving the quality of the input data as much as that of the model itself.

First of all, the assessment of stem loading can be discussed. It has been estimated indirectly through allometric laws established on a relevant sample. The final uncertainty on the load is about 10%, but the estimations should not be biased as they have been established on a relevant sample. Therefore, this factor can explain individual gaps but cannot be responsible for the globally underestimated leaning. On the other side, the loading imposed by axillary shoots was assumed to be concentrated, thus neglecting the lever arm of long shoots and, automatically, underestimating the leaning of individuals containing such shoots. However, these shoots represent a small part of the load and their length did not exceed 25 cm. Calculations made separately show that they can only account for a small part of the observed errors.

Furthermore, the assumption of no radial growth during the period is questionable since it was not strictly zero: the diameter increased by 1 to 10% of the initial diameter. The newly formed tissues have potentially three effects (Fournier et al. 1991a): (1) they act like an additional load; (2) once lignified, they participate in the support of the stem; (3) the maturation strains occurring during their lignification induces a slight correction of the stem orientation. Effect (1) works in accordance with the observed error, (2) and (3) opposite to it. Anyway, the consequences of these factors are not included in the present model and have not been quantified.

Evidencing local errors by fitting the structural MOE

Local errors produced by the model could not be checked unless individual errors were eliminated. This was obtained by adjusting the structural MOE. For every stem, the value of MOE minimising the distance between the simulated and the measured configuration was calculated. Table 1 gives the adjusted structural MOE for each stem, as well as the average distance between the points of the simulated and measured configuration. Figure 12.a,b,c shows the results of the simulations based on the adjusted structural MOE for the three stem types. In 8 cases out of 15, the average distance is lower to the centimetre and the simulated configuration is almost identical to the measured configuration. The quality of the simulations with only one adjusted parameter shows that the model is able to give account of the essential of the locally involved phenomena. However, in 5 cases, the difference was rather high (see figure 12,c for example). The poor quality of the adjustment can be assigned to local effects not taken in account by the model, since the structural MOE adjustment has corrected the individual effect on the whole stem.

This method of MOE determination is similar in principle to that used, for instance, by Leiser and Kemper (Leiser and Kemper 1973) or Morgan and Cannell (Morgan and Cannell 1987) except that these authors fitted the deflection of the loaded point whereas our criterion involved all measured positions along the stem axis. Another specificity of our work is that it concerns a loading in natural conditions, i.e., the load increase during the start of the growing season; our previous predictions of stem geometry (such as shown on figures 8 to 10) were based on the value of structural MOE measured before the start of the growing season.

Errors observed at local level after MOE fitting, can be attributed to material properties. The material of stems was assumed to have homogeneous elastic properties. Measurements of MOE of beam portions taken at different positions along the stems (unpublished data) did not show any significant correlation between the MOE and the position in the annual shoot, thus justifying the use of a structural value. However, a longitudinal variation of the MOE is likely to occur in some stems. In figure 12.c for example, a decrease of the MOE along the stem could explain the bad quality of the simulation based on structural MOE adjustment, with a bending underestimated in the basal part of the stem, and overestimated in its terminal part.

The model could be perfected by accounting for longitudinal variations of MOE. Experimental data about these variations can be obtained in a non-destructive way, through the same type of in-situ bending test than that used here. Moullia (Moullia 1993) used this type of tests on corn leaves with a local analysis that consists in calculating, for any abscissa s of the stem, a local MOE $E(s)$. The MOE is given directly by $E(s) = \Delta M(s) / I(s) \Delta C(s)$, where $\Delta M(s)$ is the variation of bending moment due to the external load at s , $\Delta C(s)$ the variation of curvature at s and $I(s)$ the inertia at s . This method requires the calculation of curvature variations, which involve the second-order derivatives of the measured co-ordinates. Therefore it is very sensitive to small measurement errors; to achieve a good precision a large number of points must be digitised.

Implications for the modelling of tree development

In the case of young fruit-trees stems, variations of bending moment during the deformation (i.e., large displacements) and viscoelastic behaviour of the stem must be taken into account to achieve a good agreement between simulations and observations. For older stems, load increments act on a lot more rigid structure, yielding much smaller displacements. Therefore, the error resulting from the SDA is likely to be smaller in aged structures. This justifies why the effect of large displacements have long been disregarded in most mechanical models (Blaise et al. 1992; Castera and Morlier 1991; Fourcaud and Lac 1996; Fournier et al. 1994). Anyway, in the case of a vertical stem loaded in the vertical direction, the SDA remains problematic because the bending moment is very sensitive to small changes of the form of the trunk. This assumption has been discarded in the recent mechanical models (Ancelin et al. 1999; Jirasek et al. 2000). In contrast, creep probably goes on, so that this error would tend to increase with the age of the structure. To our knowledge, no mechanical model of tree development does take these viscoelastic effects into account.

Previous works showed that the form of a stem is very sensitive to the amount of radial growth in the first years of its development (Fournier et al. 1994). Moreover, the dynamics of diameter growth and of loading suggest a considerable impact of the relative kinetic of the two phenomena on the bending of the fruit tree stems, and therefore the unsuitability of an annual time step for their modelling. Indeed, during the first years of their growth, axillary loads lead to a large bending while the relative increase of the inertia is considerable. The order of occurrence of these growth events is crucial to predict the bending in a satisfactory way. In apricot-tree, the fact that the weight increase precedes the diameter growth is the cause of the large bending observed. The presence of fruits is a major cause of this bending, but it is not the only one. The weight of the leaves and branches is responsible for more than 50% of the load, suggesting that these results could be extended to the stems of non fruit species, in particular when they are slender and hold abundant axillaries.

The growth of a branched system interacts with the form and orientation of its stems (Cannell and Dewar 1994; Fisher and Stevenson 1981; Wilson 2000). The objective of the mechanical modelling in this context is to give account of the consequences of the growth on the form of the stems. Reciprocally, the form and orientation of a stem influence its mode of growth through the phenomenon called gravimorphism (Smith and Wareing 1964; Wareing and Nasr 1961). The joined integration of both phenomena in growth models remains currently the object of several works (Alteyrac et al. 1999; Jirasek et al. 2000). In these models, the relation between form and growth are expressed by temporal relations: the deformation during a given period is calculated from the growth of the previous period, and partly controls the growth of the following period. In this context, we believe that the deformations undergone by a stem in early years of growth can be fundamental for the understanding of its long-term evolution. Indeed, these large displacements are subsequently frozen by the radial growth of the stem. The straightening mechanisms of the stem depend themselves on the growth processes. Even small form difference at early stages could lead, through the reciprocal dependencies between form and growth, to an important divergence in the later development.

Acknowledgements

The authors gratefully thank Jean-Claude Salles (Laboratory of Fruit Arboriculture, INRA Montpellier) for his help in growth and digitalisation measurements.

References

- Adam B, Sinoquet H, Godin C, Dones N (2000) 3A version 1.0: Un logiciel pour l'Acquisition de l'Architecture des Arbres intégrant la saisie simultanée de la topologie au format AMAPmod et de la géométrie par digitalisation 3D. Guide de l'utilisateur. INRA-PIAF, Clermont-Ferrand (France)
- Alteyrac J, Fourcaud T, Castera P, Stokes A (1999) Analysis and simulation of stem righting movements in Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). In: Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, Third Workshop of IUFRO, La Londe-Les-Maures (France), pp 105-112
- Ancelin P, Fourcaud T, Lac P (1999) Non linear structural analysis to investigate tree biomechanics. In: Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, Third Workshop of IUFRO, La Londe-Les-Maures (France), pp 95-104
- Archer R (1986) Growth stresses and strains in trees. Springer Series in Wood Science, E. Timell, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New-York

- Blaise F, Gril J, Fournier M (1992) Introduction de concepts mécaniques dans un logiciel de simulation de la croissance des plantes. In: Architecture Structure et Mécanique de l'Arbre, LMGC, Montpellier, pp 171-185
- Cannell MGR, Dewar RC (1994) Carbon allocation in trees: a review of concepts in modelling. *Advances in Ecological Research* 25:59-104
- Castera P, Morlier V (1991) Growth patterns and bending mechanics of branches. *Trees* 5:232-238
- Costes E (1993) The aerial architecture of untrained apricot trees. *Acta Botanica Gallica* 140:249-261
- Costes E, Audubert A, Jaffuel S, Jay M, Demene M, Lichou J (1995) Chronologie du développement du fruit en relation avec la croissance végétative chez l'abricotier *Prunus armeniaca* L. cv. Rouge du Roussillon. *Canadian Journal of Botany* 73:1548-1556
- Costes E, Fournier D, Salles J (2000) Changes in primary and secondary growth as influenced by crop load effects in 'Fantasme®' apricot trees. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 75:510-519
- Craig J (1989) Introduction to robotics. Addison-Westley, Reading
- Fisher J, Stevenson J (1981) Occurrence of reaction wood in branches of dicotyledons and its role in tree architecture. *Botanical Gazette* 142:82-95
- Fourcaud T, Lac P (1996) Mechanical analysis of the form and internal stresses of a growing tree by the finite element method. In: *Engineering Systems Design and Analysis*, ASME, Montpellier (France), pp 213-220
- Fournier M, Baillères H, Chanson B (1994) Tree Biomechanics: Growth, Cumulative Prestresses, and Reorientations. In: *Biomimetics*, Plenum Press New York London
- Fournier M, Chanson B, Guitard D, Thibaut B (1991a) Mechanics of standing trees: modelling a growing structure subjected to continuous and fluctuating loads. 1. Analysis of support stresses. *Ann. Sci. For.* 48:513-525
- Fournier M, Chanson B, Thibaut B, Guitard D (1991b) Mechanics of standing trees: modelling a growing structure subjected to continuous and fluctuating loads. 2. Three-dimensional analysis of maturation stresses in a standard broadleaved tree. *Ann. Sci. For.* 48:527-546
- Gril J, Fournier M (1993) Contraintes d'élaboration du bois dans l'arbre: un modèle multicouche viscoélastique. In: *Actes du 11ème Congrès de Mécanique*, Lille Villeneuve d'Ascq (France), pp 165-168
- Jirasek C, Prusinkiewicz P, Moulia B (2000) Integrating biomechanics into developmental models expressed using L-Systems. In: *Plant Biomechanics*, Freiburg-Badenweiler, pp 615-624
- Kollmann F, Côté W (1968) Principles of wood science and technology. I : solid wood. Springer-Verlag, New York
- Kozłowski T (1971) Growth and development of trees. Vol. II Cambial growth, root growth, and reproductive growth. Academic Press, New York (USA)
- Lakhoua H, Crabbe J (1975) Arching and gravimorphism in apples. I. Effects of various degrees of arching on the shape of branching and vigour. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux* 10:43-54
- Lauri PE, Térouanne E, Lespinasse JM (1997) Relationship between the early development of apple fruiting branches and the regularity of bearing - An approach to the strategies of various cultivars. *Journal of Horticultural Science* 72:519-530
- Leiser AT, Kemper JD (1973) Analysis of stress distribution in the sapling tree trunk. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 98:164-170
- Lemaitre, Chaboche (1985) Mécanique des matériaux solides. Bordas, Paris
- Lichou J, Audubert A (1989) L'abricotier. CTIFL ed., Paris (France)
- Lichou J, Jay M, Combes J (1997) Variation de la qualité des abricots dans l'arbre. *Infos - Ctifl* 135:30-33
- Milne R, Blackburn P (1989) The elasticity and vertical distribution of stress within stems of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology* 5:195-205
- Morgan J, Cannell MGR (1987) Structural analysis of tree trunks and branches: tapered cantilever beams subject to large deflections under complex loading. *Tree Physiology* 3:365-374
- Moulia B (1993) Etude mécanique du port foliaire du maïs. Ph.D. Thesis, Université Bordeaux I (France),
- Polhemus (1993) 3SPACE FASTRAK user's manual. Polhemus INC., Cochester VT (USA)

- Smith H, Wareing PF (1964) Gravimorphism in trees. 2. The effect of gravity on bud-break in Osier Willow. *Annals of Botany* 28:283-295
- Thomas R (2000) Analyse des formes de tronc par photogrammetrie pour caractériser la qualité des bois. Ph.D. Thesis, ENGREF (France),
- Timell T (1986) Compression wood in gymnosperms. Springer-Verlag,
- Timoshenko S (1953) Résistance des matériaux. Première partie : théorie élémentaire et problèmes. Librairie polytechnique Ch. Béranger, Paris
- Timoshenko S (1966) Théorie de la stabilité élastique. Dunod, Paris
- Wareing PF, Nasr TAA (1961) Gravimorphism in trees. 1. Effect of gravity on growth and apical dominance in fruit trees. *Annals of Botany* 25:321-340
- West PW, Jackett DR, Sykes SJ (1989) Stresses in, and the shape of, tree stems in forest monoculture. *Journal of Theoretical Biology* 140:327-343
- Wilson BF (2000) Apical control of branch growth and angle in woody plants. *American Journal of Botany* 87:601-607

Annexe 11 : Listes de codes des descripteurs utilisés

Descripteurs de la géométrie, de la morphologie et du chargement des axes

LONG : longueur totale de l'axe (m)

NBEN : nombre d'entrenœuds de l'axe

LGEN : la longueur moyenne des entrenœuds = $LONG / NBEN$ (mm)

DBAS : diamètre à la base de l'axe = moyenne des mesures sur les 10 premiers centimètres (mm)

DMID : diamètre au milieu de l'axe = diamètre du segment médian (mm)

DTOP : diamètre au sommet de l'axe = diamètre du segment terminal (mm)

DMOY : diamètre moyen = moyenne des diamètres de tous les segments (mm)

SMOY : surface de section équivalente au diamètre moyen = $\pi DMOY^2 / 4$ (mm²)

MOYS : surface moyenne = moyenne des surfaces de toutes les sections (mm²)

IMOY : inertie équivalente au diamètre moyen = $\pi DMOY^4 / 64$ (mm⁴)

MOYI : inertie moyenne = moyenne des inerties de toutes les sections (mm⁴)

ELAN : rapport d'élanement = $LONG / DMOY$ (m/m)

CONI : concité, ou décroissance métrique moyenne du diamètre = $(DBAS - DTOP) / LONG$ (mm/m)

VOLU : volume total de l'axe = $MOYS \times LONG$ (cm³)

INCB : inclinaison de la base = inclinaison moyenne sur les 10 premiers centimètres (°)

INCC : inclinaison de la corde = inclinaison de la ligne joignant la base et l'apex (°)

INCM : inclinaison moyenne = moyenne des inclinaisons de tous les segments (°)

CTOT : courbure totale = intégrale de la courbure locale le long de l'axe (°). Ce descripteur est aussi égal à la différence d'inclinaison entre la base et l'apex, et au produit de la courbure moyenne par la longueur. Elle est positive si l'axe est globalement courbé vers le haut, négative s'il est globalement courbé vers le bas. Par contre, elle peut être nulle sans que l'axe soit rectiligne (s'il présente un changement de courbure).

RECT : indice de rectitude = rapport entre la longueur de la corde et la longueur de l'axe, compris entre 0 et 1. Il vaut 1 pour un axe parfaitement rectiligne (m/m).

IVAP : indice de verticalité de l'apex = rapport entre la hauteur de l'apex (par rapport à la base) et la longueur de l'axe (m/m). Il est compris entre -1 et 1. Il vaut 1 pour un axe droit et vertical, 0 si l'apex est à la même hauteur que la base, et est négatif si l'apex est plus bas que la base (ce descripteur combine les notions d'inclinaison et de rectitude).

NBEN : Nombre d'entrenœuds

NBRC : Nombre de pousse courtes

NBRL : Nombre de pousses longues

NBFR : Nombre de fruits

NBVG : Nombre total de pousses = $NBRC + NBRL$

N%VG : Pourcentage de nœuds ayant donné une pousse végétative = $NBVG / NBEN$ (%)

N%RL : Pourcentage de pousses qui se sont développées en pousses longues = $NBRL / NBVG$ (%)

RL? : Présence (1) ou absence (0) de pousse longue sur l'axe = (NBRL>0)

FR? : Présence (1) ou absence (0) de fruit sur l'axe = (NBFR>0)

MFR : Masse totale des fruits (g)

MRC : Masse totale des pousses longues (g)

MRL : Masse totale des pousses courtes (g)

MPR : Masse totale du prolongement (g)

MVG : Masse totale des pousses = MRC + MRL (g)

MTOT : Masse totale des charges = MFR + MVG (g)

M%FR : Fraction massique des fruits = MFR / MTOT (%)

M%VG : Fraction massique des pousses = MVG / MTOT = 1 - M%FR (%)

M%RC : Fraction massique des pousses courtes parmi les pousses = MRC / MVG (%)

M%RL : Fraction massique des pousses longues parmi les pousses = MRL / MVG = 1 - M%RC (%)

M%PR : Fraction massique du prolongement parmi les pousses = MPR / MVG (%)

PFR : Position relative du centre de gravité des fruits (%)

PVG : Position relative du centre de gravité des pousses (%)

PTOT : Position relative du centre de gravité des charges = M%FR×PFR + M%VG×PVG (%)

Dates de références, variations et variations relatives des descripteurs

Les dates auxquelles se réfèrent les descripteurs sont codés par un numéro simple :

0 : début de saison (avant débourrement)

1 : date intermédiaire (dont précisera ultérieurement le sens)

2 : maturité des fruits (avant récolte)

3 : juste après récolte

4 : fin de saison (avant la chute des feuilles)

5 : fin de saison (après la chute des feuilles)

Par exemple, le code INCM2 désigne l'inclinaison moyenne avant récolte.

Les variations des descripteurs entre deux dates, sont codées en accolant les numéros correspondant aux deux dates. Ainsi, INCM23 désigne la variation d'inclinaison moyenne entre les dates 2 et 3, ce qui quantifie le redressement de l'axe à la récolte des fruits. $INCM23 = INCM3 - INCM2$

Les variations relatives des descripteurs entre deux dates, sont codées en accolant le symbole % et les numéros correspondant aux deux dates. Ainsi, DMOY%04 désigne l'incrément relatif de diamètre moyen entre les dates 0 et 4. $DMOY\%04 = (DMOY4 - DMOY0) / DMOY0$

Descripteurs de l'anatomie

BT% : Taux de bois de tension dans la section (%)

X_Bt : Position relative en X du bois de tension dans la section. Ce descripteur est compris entre -1 (BT concentré dans le bas de la section) et 1 (BT concentré dans le haut de la section). Il est nul si le bois de tension est centré par rapport à l'axe Y de la section.

Y_Bt : Position relative en Y du bois de tension dans la section. Ce descripteur est compris entre -1 (BT concentré sur la gauche de la section) et 1 (BT concentré sur la droite de la section). Il est nul si le bois de tension est centré par rapport à l'axe X de la section.

X_Ex : Excentrement selon X du cerne 1999 par rapport au cerne 1998. Ce descripteur est compris entre -1 (cerne complètement excentré vers le bas) et 1 (cerne complètement excentré vers le haut). Il est nul si les centres de cernes sont situés sur la même horizontale.

Y_Ex : Excentrement selon Y du cerne 1999 par rapport au cerne 1998. Ce descripteur est compris entre -1 (cerne complètement excentré vers la gauche) et 1 (cerne complètement excentré vers la droite). Il est nul si les centres de cernes sont situés sur la même verticale.

Annexe 12 : Rapports extérieurs sur la thèse

RAPPORT SUR LE MANUSCRIT DE THESE DE M' ALMERAS Tancredi

Acquisition de la forme des axes ligneux d'un an chez trois variétés d'abricotier : confrontation de données expérimentales à un modèle biomécanique

Rapporteur : Jean-Claude MAUGET, Professeur à l'INH Angers

Le manuscrit soumis par M. ALMERAS se présente sous la forme d'un volumineux document de 200 pages complétées par 10 annexes. L'ensemble est structuré en 6 parties.

Après une courte introduction consacrée au caractère pluridisciplinaire de l'architecture végétale, la thèse s'ouvre classiquement sur une analyse bibliographique centrée sur l'architecture aérienne des arbres fruitiers et des éléments de base en matière de biomécanique des végétaux ligneux, l'accent étant mis plus particulièrement sur les axes en croissance. Cette première partie (15 pages) s'achève sur les objectifs du travail et la stratégie qui sera mise en œuvre.

Une deuxième partie (30 pages) détaille les bases théoriques du calcul de la déformée d'un axe en croissance. Le travail va s'appuyer sur la théorie des poutres appliquée aux axes d'un an sous charge pondérale constituée par les pousses feuillées de l'année et les fruits. Les hypothèses simplificatrices sont présentées dont la validité sera examinée par la suite.

La troisième partie (27 pages) concerne la partie expérimentale du travail : présentation du matériel végétal - trois variétés d'abricotier, Lambertin, Modesto et Palsteyn, au port bien contrasté, description des mesures réalisées pour caractériser en dynamique la morphologie, la géométrie et le chargement axillaire des axes, présentation critique de la mesure des propriétés mécaniques des matériaux sur tronçons d'axes ou sur axes entiers *in situ*, mesure des déformations de maturation. Enfin, une étude anatomique a été mise en œuvre pour repérer le bois de tension dans les axes en croissance.

La quatrième partie (44 pages) présente les résultats obtenus tandis que la cinquième partie (23 pages) est centrée sur la validation des modèles mécaniques, des hypothèses simplificatrices faites et s'achève sur une hiérarchisation des facteurs du port.

Enfin, la sixième et dernière partie (34 pages) est une discussion générale qui aborde de façon critique les méthodes mises en œuvre et les résultats obtenus. Elle se termine sur une réflexion quant à la généralisation des résultats à d'autres génotypes et d'autres espèces et enfin leurs perspectives d'application en arboriculture fruitière.

Ce travail est un bon exemple de ce que la biomécanique peut apporter à la compréhension de l'architecture des végétaux ligneux. La modélisation mécanique des structures végétales permet d'agencer et de hiérarchiser les différents facteurs responsables de leur forme donc du port de la plante. Visiblement, M. ALMERAS maîtrise parfaitement les concepts de la mécanique des structures ce qui lui permet de poser le problème de la flexion d'un axe d'un an en l'assimilant à celui de la poutre en flexion. Cependant, un axe ligneux, objet biologique, présente des particularités rendant complexe la modélisation : irrégularité de la forme, hétérogénéité des tissus, et bien sûr phénomènes de croissance conduisant à la modification continue des dimensions de l'objet et de son chargement (poids propre, ramification, fruits...). M. ALMERAS, après avoir posé le problème dans sa complexité, propose des hypothèses simplificatrices permettant sa résolution : ces hypothèses seront validées par la suite.

Une des originalités du travail est d'avoir considéré le problème en dynamique : suivi de l'évolution des dimensions de l'axe (croissance en épaisseur), suivi des variations du

chargement de la structure (croissance des pousses feuillées et des fruits, récolte des fruits, chute des feuilles). Ceci permet de constater que le chargement est progressif donc de décomposer la flexion de l'axe en plusieurs étapes au cours desquelles peut s'appliquer l'hypothèse des petits déplacements.

Une attention particulière est portée aux déformations de maturation du bois : bien caractérisées dans les troncs rectilignes proches de la verticale, elles deviennent plus difficiles à mesurer et interpréter dans le cas d'axes de moindre diamètre et subissant plusieurs réorientations successives. De la même façon, le rôle du bois de tension n'apparaît pas vraiment déterminant dans les réorientations de l'axe : au contraire ce sont ici les variétés qui ont le plus de bois de réaction dont le port est le plus retombant. Une autre explication est donc à rechercher : dans ce cadre, M. ALMERAS discute le concept d'inclinaison de consigne proposé précédemment par d'autres auteurs mais qui ne semble pas plus convaincant. C'est donc vraisemblablement du côté des processus biologiques (perception de la gravité ou du déplacement par rapport à la position d'origine) qu'il faudra faire porter l'effort ultérieurement pour comprendre le déterminisme du redressement.

Finalement, le principal facteur responsable mis en évidence est l'élancement suivi par la charge (masse, répartition). La croissance diamétrale a un rôle important dans le redressement après récolte : si elle est précoce (intervenant sous charge des fruits), le redressement est faible ; il est important en cas de croissance diamétrale tardive.

L'approche proposée ici est donc pluridisciplinaire faisant appel à la morphologie, l'analyse de croissance, l'anatomie, la mécanique. Elle exploite la variabilité naturelle fournie par les trois variétés pour établir des lois de portée générale. C'est tout le mérite de M. ALMERAS d'avoir conduit de front un ensemble très lourd de mesures et d'observations, de traitement de données et de modélisation. Au cours de ce travail, il a été conduit à utiliser un nombre conséquent de techniques complémentaires : tests de flexion en banc d'essai pour mesure du module d'élasticité, digitalisation 3D, capteurs de mesure des déformations de maturation du bois, caractérisation de l'anatomie du bois.

Le manuscrit aurait pu être rédigé de façon plus concise : tel quel, il n'est pas exempt de redondances (on trouve à plusieurs reprises sous différentes formes la discussion sur la validité des hypothèses) ce qui rend sa lecture parfois difficile. Par ailleurs, des fautes de frappe devront être corrigées ainsi que quelques erreurs dans la bibliographie. Concernant la forme, j'aurais également apprécié une liste des nombreux symboles utilisés sur feuille mobile afin de pouvoir s'y reporter plus facilement. Par contre, j'ai trouvé judicieux les paragraphes récapitulatifs terminant chaque grande partie et résumant les principales informations à retenir.

M. ALMERAS se pose avec raison la question de la représentativité des échantillons étudiés mais je ne suis pas certain de partager entièrement le sens qu'il donne au mot « représentativité » : par exemple, pourquoi vouloir montrer que le comportement des abricotiers étudiés est absolument comparable à celui d'arbres des mêmes variétés mesurés les années antérieures ? Il est bien connu que les effets du climat ou de la taille peuvent conduire à des morphologies différentes (croissance et répartition des rameaux et de la fructification) dont la biomécanique peut aider à comprendre les conséquences sur le port si les lois trouvées ont une portée générale ce qui est sans doute prévisible.

Les perspectives dans le domaine de l'arboriculture fruitière ne sont pas toujours très convaincantes. Une voie est ouverte qu'il faudra confirmer et préciser avant de dégager des applications. Elles me semblent concerner davantage la production de matériel végétal nouveau dont certaines propriétés architecturales pourront être mieux caractérisées voire prédites par des critères biomécaniques, qu'une évolution des modes de conduite qui serait basée elle-même basée sur des considérations biomécaniques. Même si cette dernière perspective peut apparaître intellectuellement séduisante, elle me semble difficilement

compatible avec la recherche de simplification actuellement privilégiée pour des raisons économiques : par contre, une telle simplification pourrait être plus aisément atteinte par l'utilisation de matériel végétal adapté au plan architectural.

J'aurais aimé, mais c'est là un avis tout personnel, que certaines perspectives dans le domaine de l'interaction mécanique-biologie soient évoquées : je pense par exemple aux modifications de croissance des bourgeons liées à l'application par arcure d'un gradient de contraintes ou de déformation à leur voisinage. C'est certainement un domaine qui mériterait d'être réexaminé à la lumière de la biomécanique.

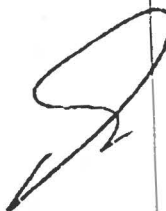
D'autres questions restent ouvertes soulignant la richesse de la démarche : étudier au plan mécanique l'évolution de la structure au-delà de la première année, introduction des paramètres mécaniques dans les modèles architecturaux...

En résumé, la thèse soumise par M. ALMERAS représente une somme considérable de travail tant au niveau de la réflexion qu'à celui de l'approche expérimentale, sur un sujet original et difficile : la biomécanique des plantes est encore peu développée en France et il convient de saluer les recherches conduites dans ce domaine. Ce travail a conduit à la rédaction d'un article soumis à la revue « Trees : structure and function ». Le raisonnement mécanique est, autant que je puisse en juger, conduit avec rigueur ainsi que la démarche de validation du modèle. Même si la partie plus biologique reste moins développée que la partie mécanique, il s'agit d'une démarche pluridisciplinaire conduite dans le cadre d'une problématique complexe et qui appelle, bien sûr, des développements ultérieurs.

J'estime donc, sans aucune hésitation, que ce travail mérite de faire l'objet d'une soutenance en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

Fait à Angers, le 15 avril 2001

Le rapporteur



Jean-Claude MAUGET
Professeur INH

RAPPORT SUR LE MANUSCRIT DE THESE DE Mr. TANCREDE ALMERAS

Acquisition de la forme des axes ligneux d' un an chez trois varieties d' abricotier: confrontation de donnees experimentales a un modele biomecanique

Prof. Georges Jeronimidis, Rapporteur

Centre for Biomimetics, Department of Engineering, University of Reading, UK

1) Considerations d' ordre general

Le travail que presente le candidat, Mr. Tancrede Almeras, se situe dans le cadre general de la biomecanique des plantes. Plus particulierement, il traite du probleme de la forme des axes ligneux dans trois varieties d' abricotier en fonction de plusieurs variables telles que geometrie, proprietes mecaniques des tissus, chargements et reponse biologique adaptive. Le sujet de la these est tres interessant du point de vue scientifique, augmentant nos connaissances en matiere, mais aussi tres et pertinent du point de vue des applications en arboriculture fruitiere qui en decoulent.

Le memoire de these represente un travail ambitieux et non indifferant quant aux objectifs selectionnes, la gamme de methodes experimentales de mesure utilisees et l' integration coherente de la vaste quantite de donnees obtenues pendant cette recherche. L' approche suivie est tres interdisciplinaire, avec un souci constant de relier les aspects mecaniques a ceux biologiques. Le resultat demontre que le candidat a atteint un niveau tres eleve de maturite de recherche, qu' il est capable de developper des idees et des approches originales et qu' il est aussi muni d' esprit critique par rapport a son travail et a celui d' autres chercheurs.

Le memoire de these est bien dense de notions, calculs et resultats, mais facile a suivre grace a son organisation logique et coherente, et a la presence de nombreuses figures et de tableaux recapitulatifs.

2) Considerations specifiques

Le memoire est divise en six parties qui couvrent les aspects introductifs, theoriques, experimentaux et integratifs de ce travail.

La Partie I situe le probleme aborde, definit clairement les objectifs et met en jeu les composantes du systeme a etudier (architecture, biomecanique des vegetaux ligneux, le materiau bois, bois de reaction, croissance, reorientation). On y trouve aussi les references plus importantes aux travaux qui ont precedes, exhaustives et recentes.

La Partie II presente le cadre theorique du calcul de la deformee d' un axe en croissance. On y retrouve des rappels de mecanique des solides, pour definir les notions plus importantes

(elasticite, anisotropie, viscoelasticite), aussi bien que de mecanique des structures pour effectuer le passage du niveau local au niveau global. Les hypotheses de travail possibles sont presentees (petites ou grandes deformations) et discutees par rapport a leurs avantages et inconvenients. Le choix qui ont ete faits et simplifications introduites sont justifies. Cette partie du travail se resume en plusieurs equations, assez generales, qui mettent en evidence le lien entre ce qui est previsible et ce qui est mesurable. Deux petites critiques: le manque de numerotation des equations et le manque de justification claire pour l' introduction des modules de Young homogeneises (avantages ?, limitations ? - une justification se retrouve plus tard dans la Partie III, page 72).

L' idee de valider la modelisation en grands deplacements avec des cas limites de flambement elastique de poutres est tres astucieuse et appreciee.

Les effets des deformations de maturation sont bien decrites dans le cas de couches concentriques completes, soit avec du bois normal qu' avec du bois de tension (pp.53-55). Par contre, dans le cas d' une couche circulaire avec un secteur de bois de tension, les equations presentees (p. 56) impliquent que le module de Young du bois de tension est le meme que celui du bois normal (choix ?, justification ?, verification ?).

La Partie III represente un travail experimental tres considerable pour obtenir toutes les donnees necessaires pour la modelisation. Les methods experimentales utilisees sont decrites en detail (sauf, peut-etre dans le cas des deformations de maturation - masse du capteur, par exemple).

La Partie IV concerne la methode pour analyser les resultants experimentaux, l' introduction des "descripteurs" pour la quantification des aspects geometriques, mecaniques, de chargement, etc. et leur utilisation. La notion de "descripteur" est tres interessante; l' etude statistique de leur dispersion et de leur correlation pour etudier redondance et en extraire les plus "adaptes" a la description du systeme est un effort a louer pour limiter le nombre de variables, malgres la complexite du probleme. Les conclusions tirees a partir des moyennes (parfois dangeereuses) des grandeurs mesurees sont mises en perspectives et moderees par le bon sens. Les diverses sources de variabilites sont mises en evidence. La notion de synchronisation de phenomenes tels que la croissance primaire (masse) et secondaire (rayon) est aussi discutee, en fonction des observations experimentales. Quelques explications auraient merite un peu plus de justification: choix un peu arbitraire du seuil correspondant a une correlation significative entre "descripteurs" (Tableaux 4 a 7 et suivants), difference entre modules de Young par Flexion 3-Points et 4-Points; valeurs choisies pour modules *in situ* (p. 118) qui ne correspondent pas aux valeurs du Tableau 21 p.117). Bon travail sur la distribution du bois de reaction et sur ses consequences et sur les axes arques.

La Partie V comprend la verification des modeles analytiques par comparaison avec les mesures experimentales. La demarche de verification est decrite et les resultats obtenus sont tres encourageants. Certains aspects de modelisation et d' interpretation de resultats sont

discutes en plus grand detail, et critiquelement. Le choix de "descripteurs" adaptes, faite en Partie IV, est renforce par les les bonnes correspondences entre formes d' axes mesurees et calculees, surtout quand les aspects viscoelastiques sont pris en consideration. La discussion des differences et de leur origine probable, ainsi que les limites de la modelisation, demontrent encore une fois l' esprit critique bien affine du candidat.

La Partie VI nous rappelle les aspects originaux de l' approche suivie, et les differences plus importantes, ainsi que les similitudes, entre ce travail de these et celui d' autres auteurs dans la litterature, qui ont touché au meme theme. La discussion des resultats obtenus et de la modelisation (et verification) est bien menee. Les ameliorations possibles pour les mesures experimentales sont suggerees et discutees, mettant en evidence avantages et inconvenients. Particulierement appreciee est la discussion sur la recherche d' une loi de reorientation biologiquement et mecaniquement coherente. Les conclusions les plus importantes et interessantes qui decoulent du travail sont mises en evidence ainsi que les perspectives au dela du systeme particulier etudie.

En conclusion, le travail presente par Mr. Tancrede Almeras dans son memoire de these satisfait completement aux criteres d' originalite, de competence, de critique et de maturite scientifique associes a une These de Doctorat. En consequence, le candidat est autorise a soutenir sa these en etat.

Georges Jeronimidis

Professor G. Jeronimidis (Rapporteur)

Centre for Biomimetics
Department of Engineering
University of Reading
Reading RG6 2AY, UK

Reading, le 11 Avril 2001

Résumé

L'architecture aérienne et le port des arbres fruitiers ont un impact direct sur la production. Afin de prendre en compte ces caractères dans les programmes d'amélioration, il est nécessaire de mieux comprendre leur déterminisme. L'objectif de ce travail est de hiérarchiser les facteurs qui expliquent la diversité de forme et d'orientation observée chez les axes d'abricotier. La modélisation biomécanique permet de relier quantitativement les réorientations des axes à différents paramètres de leur développement : dimensionnement, ramification, fructification, croissance secondaire, élasticité du bois et production de bois de tension. Ces paramètres ont été mesurés pendant une saison de croissance sur des axes de un an en port libre, issus de trois variétés à ports contrastés. Le modèle développé a été évalué par confrontation entre les simulations et les observations. Le choix d'hypothèses mécaniques adaptées permet de simuler les réorientations de façon quantitativement satisfaisante. La flexion des axes est conditionnée de façon prépondérante par leur rapport d'élanement. La charge en fruits explique aussi une part de la variabilité observée. Les différences d'élasticité des bois ont par contre un effet mineur. La dynamique conjointe de chargement et de croissance diamétrale explique les différences d'intensité du redressement à la récolte. Le bois de tension induit un redressement actif dont l'intensité diffère entre les variétés, mais n'explique pas les différences de port. Le déterminisme des redressements actifs est étudié par différentes voies complémentaires. La discussion porte sur ce point, ainsi que sur le choix des hypothèses et l'évaluation du modèle mécanique, la portée des résultats et les perspectives d'application.

Mots-clés : Biomécanique / *Prunus armeniaca* / Evaluation de modèle / Flexion / Croissance secondaire / Bois de tension / Déformations de maturation

Summary

The shape and aerial architecture of fruit trees have a direct impact on production. In order to take these traits into account in breeding programs, a better understanding of their determinism is needed. This work aims at discriminating the factors that explain the diversity of shape and orientation observed among apricot-tree axes. Biomechanical modelling allows to quantify the link between the reorientation of axes and various traits of their development: dimensions, ramification, fruit-bearing, secondary growth and tension wood production. These parameters were measured during a growth season on one-year-old axes from three varieties exhibiting contrasted shapes. A model has been developed and evaluated by comparing simulations to observations. A good quantitative agreement can be reached provided the relevant mechanical assumptions are made. The bending of axes is mainly determined by their slenderness. The load of fruits explains a part of the variability as well. Differences in wood elasticity have a weak effect. The joined dynamics of loading and secondary growth explains differences in straightening at harvest. Tension wood implies an active straightening that differs among varieties but doesn't explain differences in shape. The determinism of active reorientations was studied by different complementary ways. This point is finally discussed, as well as the choice of the assumptions and the evaluation of the mechanical model, the scope of the results and possible applications.

Key-words: Biomechanics / *Prunus armeniaca* / Model evaluation / Bending / Secondary growth / Tension wood / Maturation strains