Sur le déterminisme de la température des organes végétaux

M. Saudreau

▶ **To cite this version:**

M. Saudreau. Sur le déterminisme de la température des organes végétaux. Milieux et Changements globaux. Université Clermont Auvergne, 2022. tel-03678733

HAL Id: tel-03678733
https://hal.inrae.fr/tel-03678733

Submitted on 25 May 2022

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

INRAE Auvergne Rhône-Alpes
U.M.R. PIAF

UNIVERSITÉ Clermont Auvergne

Mémoire présenté pour l'obtention de l'
Habilitation à Diriger des Recherches (HDR)

Marc Saudreau

Sur le déterminisme de la température des organes végétaux

Université Clermont Auvergne
Ecole Doctorale Sciences de la Vie, Santé, Agronomie, Environnement

Soutenue publiquement le 19 Mai 2022
devant le jury composé de

Rapporteurs

Hélène Gautier	Directrice de Recherche, INRAE, Avignon
David Giron	Directeur de Recherche, CNRS, Tours
Marjorie Musy	Directrice de Recherche, CEREMA, Nantes

Examinateurs

Claude Gilles Dussap	Professeur, Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand
Guerric Le Maire	Chargé de Recherche, CIRAD, Montpellier

CC BY NC ND

Remerciements

Une Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) est le moment de faire un point sur un parcours scientifique et orienter au mieux ses recherches à venir. Toutefois une vie professionnelle est surtout faite de rencontres, d'opportunités, de choix et de non choix. Issu d'un milieu scientifique éloigné des Sciences du Vivant, de l'Agronomie et des Arbres, je reste persuadé que je n'aurais pas pu construire ma trajectoire au sein de l'UMR PIAF et de l'INRAE sans le soutien et la confiance de nombreuses personnes. Cette modeste HDR est le reflet de toutes ces rencontres. Les travaux exposés et futurs sont empreints des échanges entretenus au fil de toutes ces années. Il me paraissait ainsi important de commencer ce rapport d'HDR par remercier toutes les personnes qui ont jalonné mon parcours. Je sais qu'il va être difficile de citer toutes les personnes qui ont marqué mon évolution car elles sont nombreuses. Si vous tombez par hasard sur cette HDR, ne soyez pas chagriner par cet oubli, je m'en excuse, et n'hésitez pas à me contacter !

Au début de ma carrière de chercheur à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT) et au Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS), j'ai eu de la chance de croiser une multitude de personnes bienveillantes et dotées d'une intelligence rare qui ont su partager leur passion et leur savoir même si, je dois l'avouer, je ne comprenais pas un dixième de leurs exposés. Ils m'ont toutefois enrichi humainement et scientifiquement. Je garde un souvenir teinté de nostalgie de ces années passées en votre compagnie : doctorants, post-doctorants et chercheurs de ces 2 grands instituts. Un grand merci tout particulier à Georges Charnay de m'avoir accueilli au sein de l'équipe Ecoulement Et Combustion de l'époque et à Jacques Borée de m'avoir accompagné et formé avec patience au cours de mes 3 années de thèses. Un grand merci également à Olivier Simonin et Thierry Poinsot pour leurs disponibilités constantes et leurs conseils éclairés.

Mon recrutement à l'INRA était un pari de ma part et de la part de mon jury. Je ne sais pas si le pari fut gagnant mais je suis reconnaissant envers vous, Laurent Bruckler, Yves Brunet et Bruno Andrieu pour la confiance que vous avez su me témoigner et le courage dont vous avez dû faire preuve en actant le recrutement d'un « physicien ». Grâce à vous je suis rentré dans un monde nouveau et passionnant par les enjeux sociétaux abordés. A mes débuts en tant qu'« INRA » je me suis inséré tant bien que mal au sein de la grande famille des écophysiologistes et des « ex bioclimatos » travaillant sur les arbres. Cette insertion n'a pu se

faire que par un fort soutien initial de nombreuses personnes au sein de l'UMR PIAF, j'y reviendrai, mais également grâce à des personnes en dehors du PIAF comme M. Chelle, F. Lescourret, M. Génard, P. Cellier, B. Andrieu, P-E. Lauri, et E. Costes. Je peux vous l'avouer maintenant, nos premières discussions autour des modèles radiatifs, des processus élaborant la qualité des fruits, des ravageurs, des modèles FSPM, ou de l'architecture du pommier m'ont très fortement dérouté mais elles m'ont enrichi. Nos trajectoires personnelles et professionnelles ont fait que nous nous sommes parfois perdus de vue mais je vous serai toujours reconnaissant pour ce coup de pouce initial salutaire.

Venons-en maintenant à l'UMR PIAF de Clermont-Ferrand où j'ai commencé sous la houlette d'Hervé Sinoquet et de la petite bande de l'époque qui travaillait avec lui sur le rôle de la structure et du microclimat sur fonctionnement des couverts arborés: N. Donès, B. Adam et A. Marquier. Difficile de trouver des mots pour vous remercier pour toutes ces années en votre compagnie. Vous m'avez appris tout ce que vous saviez sur la digitalisation (et les fameux angles d'Euler que seul Hervé savait manipuler les yeux fermés !!), PiafDigit, VegeSTAR, RATP, etc … Vous m'avez accompagné et fait confiance tout long de ces années au PIAF. Vous m'avez fait progresser, enfin je l'espère. L'UMR PIAF est une grande famille avec tous les bons et mauvais côtés qu'impliquent une vie de famille. Je retiens de cette grande famille, une entente, une humanité et une solidarité qui m'ont porté à mes débuts et qui perdurent malgré des conditions de travail qui se dégradent au fil des ans et des départs. Ainsi je ne pourrais pas finir cette page de remerciements sans remercier tous mes autres collègues de l'UMR PIAF (ITA, BIATOSS, Chercheurs et Enseignants-Chercheurs) aussi bien côté INRAE (ex INRA) que UCA ou (ex UBP pour le plus anciens !) qui m'ont accueilli à l'époque, avec qui j'ai eu plaisir à travailler et qui font pour certains encore que je reviens avec bonheur au labo : S. Ploquin, P. Walser, C. Bodet, S. Vayssié, D. Tiziani, A. Lacointe, M. Vandamme, M. Bonhomme, B. Saint-Joanis, B. Girard, T. Améglio, H. Cochard, R. Rageau, P. Cruiziat, B. Moulia, F. Beaujard, P. Balandier, J-L. Julien, N. Leblanc, S. Herbette, N. Frizot, M. Decourteix, A. Faure, P. Chaleil, C. Lenne, P. Devret, G. Petel, S Sakr, A. Guilliot, C. Serre, J. Ngao, E. Badel. Je pourrais également rajouter d'autres personnes extérieures à l'UMR avec qui j'ai pris plaisir à travailler ou simplement discuter : S. Pincebourde, L. Parisi, L. Brun, V. Allard, C. Girousse. Une longue liste non exhaustive car j'oublie quelques autres collègues arrivés plus tard et tous les stagiaires, docs et post-doc que j'ai encadré soit partiellement, soit à temps plein avec qui je me suis parfois remis en question et auprès de qui j'ai beaucoup appris. J'espère qu'ils auront également appris quelques notions de physique et garderons un bon souvenir de leur passage au PIAF.

Enfin je souhaitais remercier également les membres du jury qui ont accepté de m'accompagner dans cet exercice. Les sollicitations sont nombreuses et le temps d'un chercheur ou assimilé est précieux, donc merci d'avance pour votre temps et pour vos remarques qui seront, sans en douter, constructives et éclairantes pour la suite de mon parcours.

Table des matières

Remerciements 3

1. Bilan : Les températures d'une plante – Variabilités spatiale et temporelle de l'organe à l'individu – Déterminisme et modélisation multi-échelles. 8

1.1. Préambule 8

1.2. Sur l'importance de la « température » pour les organismes vivants - Un facteur abiotique déterminant du fonctionnement et de la survie 11

1.3. La température des plantes et leurs environnements 16

Notion de bilan d'énergie 16

Formalisation des différents modes de transferts d'énergie 17

1.4. Température à l'échelle des organes: variabilité spatiale et temporelle 21

Organes volumiques – Modèle de fruit et tronc 24

Organes quasi 2D – Modèle de feuilles 27

1.5. Température à l'échelle de l'arbre : variabilité spatiale et temporelle 31

Distribution spatiale des températures de fruits 32

Distribution spatiale des températures foliaires 35

1.6. Durée d'humectation des feuilles et microclimat 38

1.7. Sur les approches de modélisation et méthodologiques mobilisables sur des enjeux finalisés 44

Microclimat et développement des ravageurs 45

Mitigation des stress thermiques par les arbres 46

1.8. Angles d'inclinaison et mouvement des feuilles au vent 54

2. Projet de recherche – Sur la variabilité temporelle et les services écosystémiques 61

Axe 1 – Températures gélives et dynamique de la prise en glace dans les organes ligneux 65

Axe 2 – Les arbres urbains 68

Axe 3 –Vulnérabilité aux stress thermiques des systèmes de production arborés comme l'agroforesterie. 70

3. Curriculum Vitae 72

4. Responsabilités ou participations à des programmes scientifiques nationaux ou internationaux.. 75

5. Publications 76

1. Bilan : Les températures d'une plante – Variabilités spatiale et temporelle de l'organe à l'individu – Déterminisme et modélisation multi-échelles.

1.1. Préambule

J'ai découvert l'écophysiologie en 2005 lorsque j'ai intégré l'UMR PIAF alors que ma formation initiale et mes choix guidés par mes appétences ne me prédestinaient pas à travailler sur cette thématique et dans cet environnement. En effet, attiré par la Physique et les approches de modélisation et méthodes numériques associées, je me suis très rapidement tourné vers la mécanique des fluides où la diversité des applications et la complexité de la formalisation des écoulements induisaient *de facto* une orientation vers mes thèmes de prédilections. Cette première formation en mécanique des fluides générale m'a conforté dans mes choix. J'ai poursuivi en thèse (1998-2002) au sein de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT) et de l'équipe Ecoulements Et Combustion (EEC) animée par Mr Charnay sur l'étude des mélanges turbulents interne dans le cadre de problématiques de réduction des consommations des moteurs et de les faire fonctionner en mélange pauvre [MS 31-32]. Dans ce cadre privilégié car entouré à la fois de théoriciens, d'expérimentateurs, et de modélisateurs, j'ai pu aborder plus largement la modélisation des écoulements turbulents, notamment les méthodes RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) et m'initier aux approches de LES (Large Eddy Simulations) et de DNS (Direct Numerical Simulation). Je ne pourrai jamais remercier assez toutes les personnes que j'ai côtoyées lors de ma présence à l'IMFT mais certaines dont J. Borée, O. Simonin et T. Poinsot, m'ont énormément apporté et aiguillé mes choix futurs. Au-delà de la connaissance des formalismes inhérents à la modélisation des processus, la modélisation a toujours été également pour moi synonyme de maîtrise des outils numériques de résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles et des langages de programmation associés (Fortran, C, C++, Python). Même si ces connaissances, ou du moins leurs applications, sont plus du ressort du métier d'ingénieur, il me paraît inconcevable de ne pas maîtriser en partie ces outils pour un chercheur travaillant sur des thématiques où l'approche numérique est incontournable et permet d'avancer. Après la thèse j'ai ainsi continué à progresser sur tous ces aspects car j'ai eu l'opportunité d'intégrer le CERFACS et l'équipe Combustion animée par T. Poinsot. Trois années très riches et passionnantes sur des projets industriels en aérodynamique externe et interne, et où ma formation en combustion, en mélange turbulent, et en simulations numériques (DNS et LES) a continué. Cette immersion prolongée au CERFACS m'a convaincu de l'intérêt et de la nécessité

d'aller vers du calcul intensif afin d'appréhender la complexité du monde réel où les échelles spatiales, les échelles temporelles et les processus sont multiples et en interactions.

Après toutes ces années bien loin de l'écophysiologie et des questions finalisées portées par l'INRAE, la question du pourquoi de cette orientation est légitime. Ce choix a reposé sur deux aspects disjoints et une opportunité. La première raison est liée à une situation de chercheur précaire que j'aurais pu prolonger (CDD) mais je souhaitais stabiliser ma situation à plus long terme. La deuxième raison est liée à des sentiments qui m'ont toujours habité: être utile et comprendre le monde qui m'entoure. Je ne souhaitais ainsi pas me spécialiser en combustion turbulente car je sentais que cette spécialisation allait m'enfermer dans un domaine très spécifique. La bioclimatologie (ou plus précisément l'écophysiologie mais c'est une discipline que je ne connaissais pas à l'époque) où les interactions entre organismes et environnement sont complexes, multifactorielles et nécessitent des approches multi disciplinaires m'intéressaient fortement. Une fenêtre s'est ainsi ouverte en 2005 avec mon arrivée à l'UMR PIAF au sein de l'équipe Architecture et Microclimat (AMI) dans le cadre d'une ouverture de poste de chargé de recherche sur la température des organes en collaboration étroite avec Hervé Sinoquet. Ce nouvel environnement scientifique totalement différent de mes expériences précédentes a rendu mes premières années un peu difficiles et peu claires dans le déroulé de mon activité scientifique. Le décès d'Hervé Sinoquet en 2008 a quelque peu bouleversé le fragile équilibre mis en place et m'a contraint à prendre en charge des aspects que j'avais négligés : modélisation du rayonnement, acquisition de l'architecture, la modélisation structure-fonction, et bien d'autres aspects portés par Hervé, ainsi que des responsabilités plus transversales comme l'animation d'équipe. Souvent qualifié de « référent physicien » du laboratoire j'ai ainsi contribué à beaucoup de petits projets sur de nombreuses thématiques et j'ai mis du temps à trouver ma voie. Avec le recul ces quelques années de flottement étaient peut-être un mal nécessaire pour me familiariser avec le monde des arbres et de l'écophysiologie. Heureusement la bienveillance de la famille « Bioclimato » de l'époque sur mon ignorance des arbres, et le soutien quotidien de collègues de l'UMR PIAF disparus ou encore présents, technicien-e-s, ingénieur-e-s ou chercheurs-e-s, m'ont permis petit à petit de retrouver un semblant de chemin. Ce rapport d'HDR retrace le fil conducteur principal de ma démarche scientifique au cours de toutes ces années. Démarche que je n'aurais pas pu construire seul et une grande partie du « PIAF » en est le ferment.

Ecrire un mémoire nécessite de faire des choix et cette HDR ne déroge pas à cette règle. Ain si cette HDR occulte malheureusement une grande partie de mon activité liée aux nombreuses interactions avec mes collègues sur d'autres questions scientifiques, numériques, techniques et

de vulgarisation. Par exemple la partie acquisition de l'architecture des couverts par digitalisation électromagnétique que j'ai reprise au décès d'Hervé Sinoquet avec l'aide de Nicolas Donès et de Boris Adam, ne sera pas abordée malgré mon investissement conséquent notamment sur la partie reconstruction.

1.2. Sur l'importance de la « température » pour les organismes vivants - Un facteur abiotique déterminant du fonctionnement et de la survie

La « température » est une variable clef pour tous les organismes vivants car elle impacte les processus physiques et biologiques qui régissent leur fonctionnement et leur survie [1]. Son importance est établie depuis longtemps même si les principes d'action de la température sur les organismes sont complexes à appréhender [2, 3]. En effet le facteur thermique intervient à la fois les propriétés des milieux intra et extra cellulaires (viscosité, fluidité membranaire, thermomécanique), et les processus physique (flux d'énergie et de masse, changement d'état) et chimiques (réactions enzymatique) qui s'y déroulent. Un des points remarquables est que ces relations mesurées à très petite échelle (enzymes, membranes, tissus) s'observent également à plus grande échelle (organe, individu) via des corrélations fortes entre traits observables et température. Par exemple les vitesses des réactions chimiques intervenant dans les processus biologiques à l'échelle moléculaire dépendent de la température locale. Cette dépendance induit une corrélation forte entre température et réactions enzymatiques [4] (Figure 1a). A faible température l'activité métabolique et les fonctions associées sont ralenties. A haute température, les molécules intervenant sont dénaturées et les fonctions sont dégradées à mesure que les températures augmentent. Entre ces 2 extrêmes, il existe une température optimale ou l'activité métabolique et les fonctions associées sont maximales. Le même patron de réponse s'observe à plus grande échelle sur une multitude de processus : fonctionnement [5], échange gazeux [6], taux de développement [7], performance [8], taux de reproduction ou de germination [9], parmi d'autres (Figure 1b). Ce type de schéma d'action est assez universel car il s'observe aussi bien chez les champignons que les animaux en passant par les insectes et les plantes, et présente la caractéristique d'être non linéaire [10]. Cette dépendance thermique est accentuée chez les organismes ectothermes qui ne sont pas capables de réguler leur température interne et dont la chaleur corporelle est conditionnée par les conditions microclimatiques environnantes. Ce

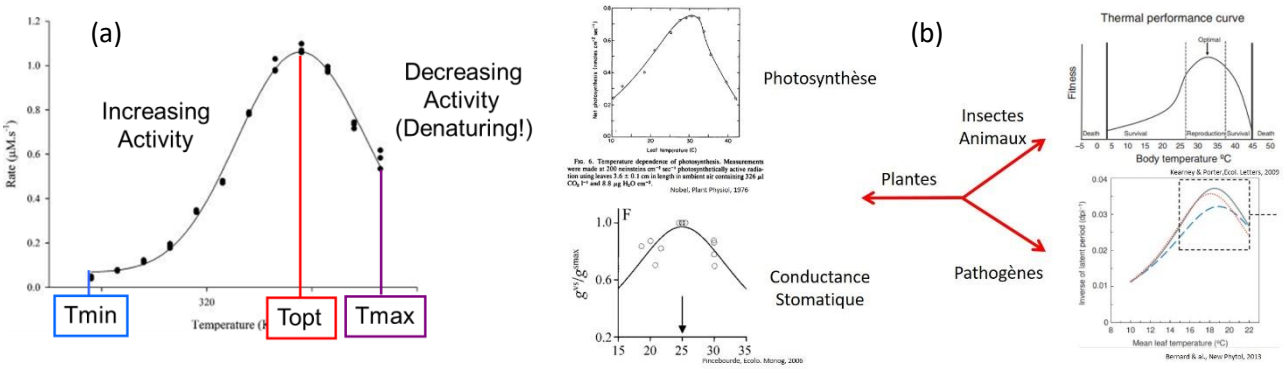


Figure 1 : Exemples de réponses fonctionnelles des organismes à la température : (a) l'activité enzymatique à l'échelle moléculaire et (b) traits fonctionnels à l'échelle des organismes.

vocable est généralement appliqué aux animaux mais il convient également parfaitement aux plantes et plus particulièrement aux arbres dont la température dépend fortement de leur environnement et fluctue au cours du temps [11]. Les végétaux ont tout de même certaines capacités de régulation thermique en cas de surchauffe, notamment les feuilles via leur transpiration [12]. Par contre les plantes ne peuvent pas se défendre contre le froid en dépensant de l'énergie étant ainsi très vulnérables aux températures gélives [13]. En conséquence, et même si la température n'est pas le seul paramètre abiotique conditionnant le développement des organismes, les caractéristiques thermiques climatiques et pédoclimatiques locales et leurs évolutions, en lien avec les changements climatiques, impactent fortement le développement et la survie des espèces. En effet selon le sixième rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, la température à la surface du globe continuera d'augmenter au moins jusqu'au milieu du siècle dans tous les scénarios d'émissions envisagés [14]. Sans politique climatique, le réchauffement planétaire de 1,5°C et 2°C sera dépassé au cours du 21e siècle et pourrait atteindre jusqu'à 5°C à l'horizon de 2100. Ce constat rend urgent de mieux comprendre les liens entre climat local et microclimat local effectivement ressenti par les organismes en général et les arbres en particulier. Par exemple les aires de répartitions des insectes [15], des essences forestières sont fortement corrélées avec l'altitude et les température gélives, leurs évolutions sont en phase avec l'augmentation de la température moyenne de l'air induit par les changements climatiques [16]. Sur des tendances globales i.e. à grande échelle spatiale et sur des temps longs, la température de l'air est une bonne approximation de la température réelle des plantes et est une variable explicative pertinente. Toutefois le choix de la température de l'air gomme la variabilité des températures réellement subies par les plantes et les organismes hôtes. En effet la température d'un végétal est le résultat d'un équilibre énergétique entre les différentes flux émis et reçus [12], et sa température peut fortement différer de la température air de plusieurs degrés [17, 18] (Figure 2a). Cette différence est importante et la non coïncidence entre les échelles

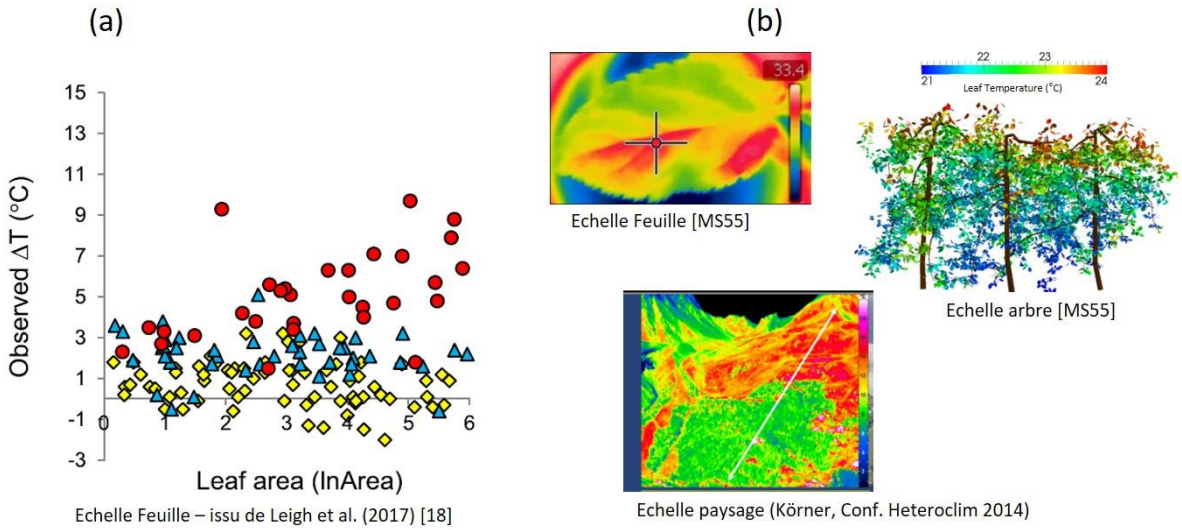


Figure 2 : (a) différences observées entre température moyenne de feuille à midi en hiver (symboles bleu), en été (symboles rouge) et à l'automne (symboles jaune) en fonction de la taille des feuilles [18]. (b) Illustration de la variabilité spatiale des températures foliaires à différentes échelles spatiales (organe, arbre, paysage).

spatiales représentatives des organismes étudiés et les échelles spatiales d'études généralement largement plus grandes interroge [19]. La prise en compte de ces hétérogénéités semble pourtant une évidence au vue de la non linéarité des réponses thermiques (croissance, respiration, développement des ravageurs par ex.) qui sont parfois de type « on–off » au-delà d'un certain seuil (stress gélif ou stress thermique par ex.) et semble nécessaire dès lors que l'on cherche à comprendre les occurrences d'« aléas » thermiques climatiques ou quand les processus d'intérêts ont des échelles temporelles caractéristiques petites. Citons par exemple les brûlures corticales estivales des fruits [20] et hivernales des troncs [21], les mécanismes de nécrose de l'écorce et d'embolie du xylème, en relation avec le gel [22], la chute physiologique [23], l'accumulation en sucres et en acides, la synthèse de caroténoïdes dans le fruit [24], la résilience des arbres aux évènements extrêmes [25], la morphogénèse foliaire [26] ou le cycle de développement des ravageurs dans un couvert (e.g. mineuses des feuilles [27], champignons [28]. Une caractéristique importante des arbres est que l'extrême structuration spatiale du houppier génère une mosaïque de conditions microclimatiques (ombre vs lumière; sous le vent vs au vent par exemple) qui induit une forte hétérogénéité spatiale du bilan d'énergie et donc des températures en terme d'intensité et de dynamique (amplitudes et occurrences des extrêmes thermiques) [17, 29, 30]. Il est ainsi impossible de définir « une » température unique et la définition des « températures » des organes végétaux apparaît comme nécessaire (Figure 2b). Dans certains cas, ces variations spatiales de température induites au sein du couvert sont déterminantes sur la croissance des organes et l'occupation de l'espace, la qualité des fruits, ou l'épidémiologie. Par exemple, la qualité des fruits présente une variabilité intra-arbre souvent supérieure à la variabilité inter-arbres [31]. Elle

peut être recherchée comme dans le cas de la couleur de la peau des fruits qui est une conséquence des gradients locaux de température de surface [32] ou subies comme les brûlures corticales ou coups de soleil [20].

Les nombreux exemples cités précédemment illustrent l'importance du facteur thermique dans le fonctionnement des organismes, et la difficulté d'appréhender « la » température d'intérêt pour un processus donné [33]. Ils soulignent également la nécessité d'aller plus loin que la simple prise en compte de la température de l'air et d'avancer dans la compréhension du déterminisme des températures des plantes. Au-delà des aspects fonctionnels et de survie, l'explicitation de la variabilité du facteur thermique permet d'abonder des questions finalisées en phase avec les questions environnementales exprimées actuellement par la société civile: (i) les services écosystémiques rendus par les arbres en ville notamment pour la lutte contre les ilots de chaleur urbain [34]; (ii) la réduction des intrants chimiques en protection des cultures en étudiant la régulation des bioagresseurs des arbres via le levier architecturale et microclimatique [35] ou (iii) l'étude des systèmes culturaux et d'élevages plus résilients face aux changements climatiques comme les systèmes agroforestiers [36].

Dans ce contexte, mon activité de recherche vise à mieux comprendre et appréhender la **dynamique** et le **déterminisme des températures** chez les plantes en général et chez les arbres en particulier. Il est centré sur **la température des organes**, s'oriente vers la caractérisation de

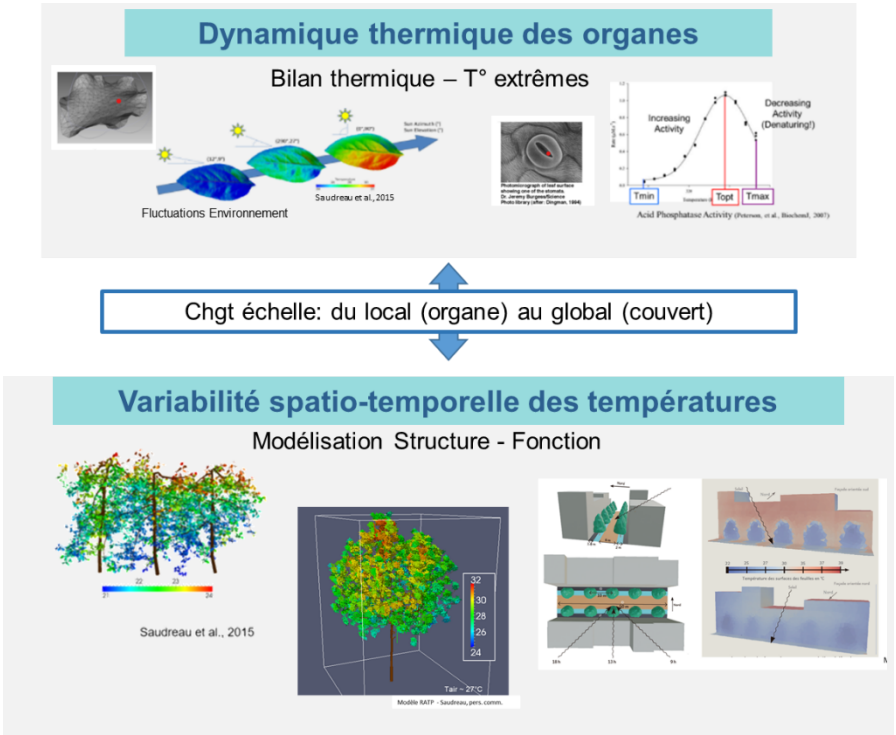


Figure 3 : Schéma illustrant mon activité de recherche sur la dynamique et le déterminisme des températures chez les arbres en lien avec la diversité des types, d'orientation et de formes des organes constitutifs d'un arbre, les conditions environnementales (microclimat) et leurs fluctuations au cours du temps.

ses **variabilités spatiales et temporelles** en lien avec la diversité des types, d'orientation et de formes des organes constitutifs d'un arbre, les conditions environnementales (microclimat) et leurs fluctuations au cours du temps (Figure 3). Il vise à expliciter les facteurs (forme, agencement spatial, climat, réponses physiologiques) qui génèrent ces variabilités, avec comme modèle d'étude les arbres. Je m'intéresse aux variabilités spatiales à petite échelle (intra-organe) versus les variabilités à plus grande échelle (inter-organes) et leurs liens. Ainsi et sur les aspects thermiques, mon activité de recherche peut se décliner 3 grands fronts ou questions de recherche :

- **Questions** : Quelle est le température d'une plante et quel est son degré de divergence avec la température de l'air ? **Fronts de recherche associés** : variabilités spatiale et temporelle, et échelle d'observation des processus thermique.
- **Questions** : Quel est le déterminisme des températures d'une plante ? **Fronts de recherche associés** : identification des principaux processus déterminant et quels leviers sont admissibles pour moduler et/ou contrôler les températures des plantes ?
- **Questions** : Quelles approches de modélisation et méthodologiques sont mobilisables ? **Fronts de recherche associés** : développement d'outils de simulation pour appréhender cette complexité

Mon approche d'explicitation des liens de causalité entre facteurs et variabilités observées passe principalement par la modélisation. Toutefois le nécessaire paramétrage amont des modèles - caractérisation des conditions microclimatiques, l'explicitation de réponses fonctionnelles et de l'architecture des arbres – et leurs validations m'ont conduit également à envisager des démarches expérimentales. Enfin je décline cette thématique de recherche sur deux échelles : organe et canopée, et je privilégie une approche ascendante (« bottom-up ») pour relier ces deux échelles. Ce rapport explicite ma démarche via quelques exemples qui m'ont paru les plus pertinents au cours de ces quelques années de recherche en lien avec ces questions mais qui laisse de côté de nombreux aspects méthodologiques nécessaire à mes activités de recherche.

1.3. La température des plantes et leurs environnements

La température est initialement une notion subjective basée sur la sensation de froid ou chaud. D'un point de vue physique elle est associée à des transferts de chaleur ou d'énergie (des zones chaudes vers les zones les plus froides) avec l'environnement ou à une production de chaleur interne. Ainsi la compréhension de l'évolution de la température des arbres au sein de leurs environnements ne peut se faire qu'à partir de la connaissance des principes physiques qui gèrent ces échanges et de leurs formalisations mathématiques. Même si ces notions sont largement présentées dans la littérature scientifique en écophysiologie ou en bioclimatologie des plantes [12], il me paraît nécessaire d'en rappeler rapidement quelques éléments principaux qui sont à la base de mes travaux de recherche et serviront de référence aux travaux exposés dans ce rapport.

Notion de bilan d'énergie

La variation de température d'un organe est le résultat du bilan d'énergie entre des flux entrants et sortants et d'un transport interne. La variation de température d'un organe peut ainsi s'exprimer à partir de l'expression de la conservation de l'énergie interne et des flux d'échange à sa surface. Les équations qui régissent cette variation de température locale, $(\frac{\partial T}{\partial t})$, peuvent s'écrire ainsi *:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla}.\vec{D} - \vec{V}.\vec{\nabla}T + \mathrm{L} \qquad \text{(Eq 1)}$$

$$(\vec{\mathrm{k}}\,.\,\vec{\nabla}\mathrm{T}).\vec{n} = \lambda_E + R_n + \Phi \qquad \text{(Eq 2)}$$

où ρ est la masse volumique (kg.m^{-3}) et C_p la capacité thermique à pression constante (J.kg^{-1}.K^{-1}) du milieu., et $\vec{n}$ la normale sortante à la surface du système considéré. Ce système d'équations indique simplement que la température d'un organe est fonction du bilan d'énergie à sa surface (Eq 2). Ce bilan dépend des interactions avec son environnement qui se font sous forme d'échange d'énergie radiative (R_n), convective (Φ) et par transpiration (λ_E). Dans le cas où ces flux à la surface s'équilibre ou si le flux diffusif est négligeable alors le système se réduit à $\lambda_E + R_n + \Phi = 0$. La température de l'organe ne va plus changer, il sera donc à l'équilibre avec son environnement. Dans le cas où l'énergie disponible à la surface est non nulle, cette énergie est ensuite « transportée » plus ou moins rapidement suivant les capacités de transport interne (Eq. 1), et va conditionner l'évolution du champ de température de l'organe. Ce transport peut se faire soit par diffusion, $-\vec{\nabla}.\vec{D}$, soit par mouvement d'eau, $-\vec{V}.\vec{\nabla}T$. De la chaleur peut également être

* Ces équations supposent que les changements de pression sont négligeables et ne considèrent qu'une seule température par phase. J'ai volontairement fait figurer ici des termes non explicités par la suite pour illustrer la complexité des types de transport de la chaleur (V.∇T - advection) ou de production L de chaleur (changement de phase, activité métabolique) qui peuvent intervenir mais qui ne seront pas développés car négligeables ou absents dans les thématiques que j'ai abordées dans le bilan. Toutefois ces termes seront évoqués dans la partie projet de recherche dans le cadre de la problématique hivernale

produite ou consommée par l'activité métabolique ou par changement de phase (prise en glace par exemple), L. La majeure partie de mon travail de recherche de modélisation se concentre sur la résolution de ces 2 équations car elles permettent d'expliciter les liens de causes à effet entre l'environnement microclimatique local, notamment ses variations, et les gradients spatiaux de température et leurs dynamiques à la surface et dans les organes végétaux.

Formalisation des différents modes de transferts d'énergie

Dans le cadre de mes projets de recherche je m'intéresse à 3 principaux modes de transferts d'énergie [MS12, MS21, MS30]. Les deux premiers sont liés à la mise en contact de deux éléments de température différente qui vont échanger de l'énergie depuis la zone la plus chaude vers la zone la plus froide. Il s'agit du transfert d'énergie par diffusion qui intervient sans mouvement de fluide et du transfert d'énergie par convection qui est la conséquence d'un mouvement d'un ou de plusieurs fluides. Le troisième mode de transfert est un mode à plus longue distance par rayonnement électromagnétique. Ces différents flux se formalisent comme suit.

Diffusion Thermique D

La diffusion thermique repose sur la loi de Fourier. Le flux de chaleur D (W/m^2) entre la surface d'un organe et les tissus internes ou entre tissus s'exprime par :

$$\vec{D} = \vec{\vec{k}} \,.\, \vec{\nabla} T \qquad \text{(Eq. 3)}$$

où $\vec{\vec{k}}$ est un coefficient de diffusion thermique ($J.m^{-1}.K^{-1}$). Il peut être anisotrope i.e. traduisant une variabilité directionnelle du flux de chaleur, et varie selon les caractéristiques du milieu : typologie des tissus, teneur en eau et composés, et température locale. Le processus de diffusion est directionnel et proportionnel au gradient de température $\vec{\nabla} T$.

Convection

L'échange d'énergie par convection avec l'air ambiant est un processus complexe car intimement lié au mouvement de la masse d'air à proximité d'une paroi, appelé aussi écoulement de couche limite [37]. Cet écoulement de proche paroi dépend de la vitesse moyenne du vent incident, de sa turbulence mais aussi de la rugosité de la paroi et de sa forme. Toutefois il est possible d'exprimer ce flux d'énergie ($W.m^{-2}$) à l'échelle macroscopique. Il est proportionnel à la différence de température de surface et de l'air :

$$\vec{\Phi} = \rho_a . Cp_a . g_b . \Delta T . \vec{n} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

où ρ_a et Cp_a sont la densité (kg.m^{-3}) et la capacité thermique à pression constante (J.kg^{-1}.K^{-1}) de l'air ambiant pris à l'extérieur de la couche limite et $\vec{n}$ le vecteur normal unité à la surface. Cette approche macroscopique permet de ramener toute la complexité de l'écoulement de la couche limite (caractère turbulent ou non par exemple) dans le terme de g_b (s.m^{-1}) qui est la conductance de couche limite [38] [MS 12]. Cette simplification a bien sûr des conséquences sur la précision de la quantification des échanges à travers la couche limite. Minimiser ces conséquences conduit généralement à complexifier la formulation de g_b [38].

Rayonnement

Le rayonnement est la source principale de chaleur des plantes et participe activement à son fonctionnement via son rôle dans la photosynthèse et la morphogénèse. D'un point de vue théorique, tous les éléments de l'environnement sont susceptibles de produire un flux radiatif, s'étalant sur une certaine gamme spectrale et fonction de sa température de surface : $R \sim \sigma T^4$ ($\sigma \approx 5{,}670\,400.10^{-8}$ J s^{-1} m^{-2} K^{-4}, loi de Stefan Boltzmann (1880), théorisée par Planck en 1900), ou d'absorber, de réfléchir et transmettre un flux radiatif. Sur les aspects thermiques des organes végétaux, il est important de considérer les ondes dites « courtes », de 300 à 1500nm, et les ondes dites « longues », au-delà de 1500nm. Les ondes courtes sont directement liées au rayonnement issu du soleil dont la surface est à une température approximative de T ~6000K. Suivant la loi de Planck, le flux radiatif maximal émis par le soleil est émis à la longueur de 500nm. Les grandes ondes sont émises par les objets dont la température est proche de la température ambiante. La température terrestre étant en moyenne de 15°C, la longueur d'onde d'émission des ondes dites « longues » est de l'ordre de 10 µm. Il est important de comprendre que tous les éléments qui constituent un paysage urbain, agricole ou forestier : bâtiments, arbres, bosquets, sol, eau, organismes, etc …, émettent des flux radiatifs en fonction de leur température de surface et sont également susceptible d'absorber, réfléchir, transmettre les rayonnements reçus. Les échanges thermo-radiatifs *in natura* peuvent ainsi devenir très complexes à appréhender d'où le nécessaire développement d'outils de modélisation de ses transferts [39, 40], et la nécessaire caractérisation des propriétés optiques des éléments du paysage et des plantes en particulier [41].

Dans le cadre de mes travaux, les flux radiatifs sont *a minima* décomposés (i) en courtes (*sw*) et grandes longueurs d'onde (*lw*), (ii) en considérant le rayonnement directement (R_d) issu du soleil, le rayonnement rediffusé par les molécules du ciel (R_{diff}), le rayonnement transmis ou réfléchi par l'environnement (R_{sw}), (iii) les flux de grandes longueurs d'onde issu de l'atmosphère (Latm), du sol (Lg) et des autres éléments environnants (Lw) et (iv) le flux réémis fonction de la température de l'objet ou organisme considéré. Une difficulté majeure réside dans le caractère

directionnel des flux radiatifs. Leurs formulations mathématiques passent par des intégrales de flux par unité d'angle solide qui sont hors de propos de ce document [42]. Ainsi et en supposant que les flux radiatifs ci-dessous ont déjà été intégrés, le rayonnement net absorbé par un organe, R_n, bilan des flux incidents et émis, peut se résumer comme suit:

$$R_n = (1 - a_{sw})\left(R_d + R_{diff} + R_{sw}\right) + (1 - a_{lw})\left(L_{atm} + L_{gr} + L_{lw}\right) - \varepsilon\sigma T_f^4 \qquad \text{(Eq. 5)}$$

où a_{sw}, et a_{lw} sont les coefficients de rediffusion (somme des coefficients de réflexion et de transmission) dans les courtes et grandes longueurs d'onde respectivement, et ε l'émissivité de l'organe considéré. Ces coefficients rediffusion varient en fonction de la forme, de la couleur, et de la rugosité de surface.

Mode de régulation thermique par transpiration

L'évaporation de l'eau par les feuilles ou les fruits participe activement à leur bilan thermique. Cet échange d'énergie est la conséquence de l'évaporation de l'eau liquide contenue dans ces organes. Ce changement de phase liquide/gaz est un processus endothermique et va donc participer à refroidir ces organes. D'un point de vue physique, le volume d'eau évaporée est directement liée à la différence de quantité de vapeur d'eau présente dans l'air et la quantité de vapeur d'eau admissible dans ce même volume d'air, autrement appelé dans la littérature le déficit de pression de vapeur de l'eau ou VPD (vapor pressure deficit). Ces quantités peuvent s'exprimer via la pression de vapeur d'eau dans l'air $e_{vap}(T_a)$ (en Pa) et la pression de vapeur saturante dans l'air $e_{sat}(T_f)$ (en Pa). Ainsi le flux de transpiration, λ_E (W.m^{-2}) à la surface d'un organe se formalise par [12]:

$$\lambda_E = \frac{\rho_a . Cp_a}{\gamma} . g_w . (e_{sat}(T_f) - e_{vap}(T_a)) \qquad \text{(Eq 6)}$$

Où γ est une constant dite psychrométrique (≈ 66 Pa.K^{-1}) et g_w une conductance variable (s.m^{-1}). L'équation 6 montre que le flux de transpiration est tout d'abord un processus climatique car piloté par le VPD qui détermine le taux maximal d'évaporation. Dans la réalité cette évaporation est contrôlée ou limitée par les propriétés structurelles (taille, densité surfacique) et fonctionnelles (contrôle physiologique ou réponse climatique) des sites d'évaporation. Dans le cas des feuilles, la transpiration a lieu dans les chambres sous stomatique et les stomates ont la capacité de se fermer ou de s'ouvrir sous l'effet des contraintes environnementales et physiologiques : potentiel hydrique, rayonnement, température de la feuille, hygrométrie de l'air. g_w est alors qualifiée de conductance stomatique. De multiples formulations de g_w ont été proposées afin de prendre en compte ce déterminisme stomatique et font encore l'objet de recherche actives [6, 43]. Le point saillant ici est la dépendance non linéaire de g_w aux variables physiques et physiologiques. Dans

le cas des fruits, cette évapotranspiration se fait via des stomates situés à leurs surfaces qui ne régulent pas activement le flux de transpiration. La capacité de transpiration est donc fonction de la croissance des fruits (la densité surfacique de stomates diminuant avec l'augmentation du volume) ou d'éventuelles lésions corticales [44]. Ce processus de transpiration est le seul terme du bilan thermique qui soit contrôlé en partie par une plante en lien avec leur « stratégie » de gestion de la ressource hydrique [6]. En contrôlant l'ouverture ou la fermeture de ses stomates, une plante va ainsi modifier son état thermique et induire soit un rafraîchissement (évaporation importante), soit un réchauffement (évaporation nulle) [12].

1.4. Température à l'échelle des organes: variabilité spatiale et temporelle

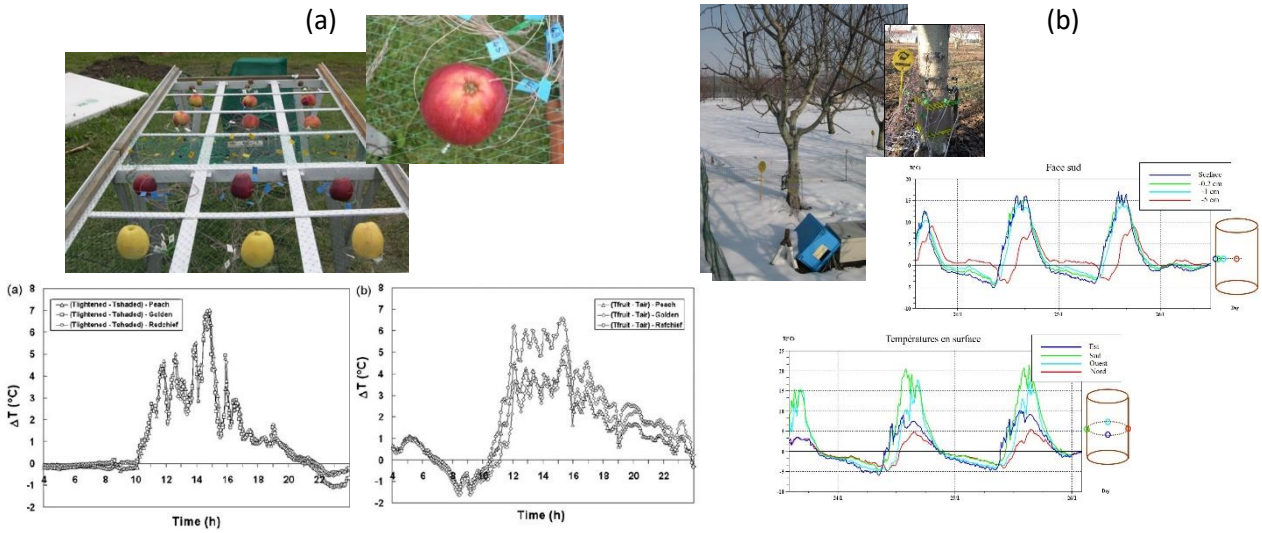


Figure 4 : Dispositifs expérimentaux mis en place pour la mesure des températures d'organe volumiques : (a) fruits [MS30] et (b) troncs [MS 92]

Les feuilles sont l'interface des échanges gazeux entre une plante et son environnement aérien et la température foliaire conditionne fortement l'intensité de ces échanges. Elles ont donc été largement observées *in natura* notamment sur les aspects thermiques et de très nombreux articles mentionnent des températures foliaires. Il est ainsi avéré que la température moyenne des feuilles peut s'écarter considérablement de la température de l'air ambiant [45-47]. Notamment pour des feuilles exposées à la lumière du soleil, il a été constaté que la température de surface des feuilles peut être supérieures de plus de 3 °C chez certains feuillus [48], 4 °C chez les feuilles de haricot vert [49], 4-5 °C chez les feuilles d'érable sycomore et de chêne [50], jusqu'à 9 °C chez les feuilles de pommier [51] et jusqu'à 14,5 °C ont été observées sur des feuilles d'espèces ligneuses [18]. Les autres organes volumiques comme les fruits, bourgeons, branches, ont été moins observés même si la température est un déterminant de la qualité des fruits [32], des dégâts liés au gel et aux surchauffes [20, 22] et du développement des organismes hôtes dont les ravageurs [10, 52]. Citons tout de même les travaux précurseurs de Thorpe et al (1974) [53] qui a montré que la distribution spatiale de la température au sein des fruits n'est pas uniforme et des gradients de température jusqu'à 10°C peuvent se produire dans les vergers. Ce manque de données est à l'origine du projet innovant sur la température des fruits financé en 2005 par le département Environnement et Agronomie. J'ai intégré ce projet à mon arrivée et effectué l'analyse des données et la modélisation [MS 97]. Ce travail inter unité INRAE regroupant l'UMR EGC (Grignon), l'UMR LEPSE (Montpellier), l'UR PSH (Avignon), et l'UMR PIAF (Clermont-Ferrand) portait sur la dynamique thermique de fruits isolés : pêches, abricots, pommes, raisins (Figure 4a). Ce travail a confirmé l'intensité des gradients thermiques au sein des fruits avec des

gradients de plus de 7°C (~1°C/cm) entre les faces éclairées et les faces ombragées des fruits, et des températures au centre des fruits pouvant être de plus de 4°C supérieures à la température de l'air lors de journées ensoleillées. Ces mesures mettent en évidence également que ces niveaux de température et de gradients thermiques perdurent pendant plusieurs heures et suggèrent que ces gradients pourraient jouer un rôle dans le développement (maturation, coloration) des fruits. Il est important de noter que ces résultats ont été obtenus sur fruits détachés et donc non alimentés en eau. Même si la quantité d'eau évaporée à travers la surface de fruits sains est faible [54], une surestimation des gradients thermiques comparativement à des fruits non détachés était possible. Ce constat a contribué à la mise en place d'une expérimentation en vergers exposée dans une deuxième partie de ce document.

A la suite de ces expérimentations sur fruits, j'ai entrepris en 2006 des mesures de gradients thermiques sur des troncs de Noyer (Figure 4b) en situation hivernale. Ce travail s'insérait dans une collaboration avec T. Améglio de l'UMR PIAF sur la résistance au froid des arbres et sur la survenue et la réparation des embolies hivernales. L'embolie hivernale est principalement liée aux cycles de gel/dégel dans la zone cambiale qui induit des mouvements d'eau important vers les points de nucléation pouvant induire des embolies au sein du xylème [22] ou des lyses des cellules corticales. L'apparition de nécroses corticales ou des problèmes de survie peuvent alors apparaître à plus long terme [21]. Or en hiver un arbre isolé est soumis à un environnement thermique très fluctuant avec des variations journalières de température de l'air importantes et des gradients de rayonnement solaire intense favorisé par l'absence de feuillage avec une dissymétrie d'action (face ombragée / face éclairée). Il n'est pas inintéressant de noter la similarité de ces gradients de rayonnement à ceux perçus par des fruits durant la saison estivale. Les objectifs de cette expérimentation étaient (i) d'approfondir la connaissance de l'état thermique des parties ligneuses en termes de répartitions spatiale et temporelle et les relier aux fluctuation du microclimat notamment radiatif, et (ii) d'initier un travail de modélisation de la dynamique thermique des parties ligneuses. Les données recueillies montrent une forte dynamique spatiale et temporelle pilotée par la course du soleil (sources radiatives) avec une dissymétrie forte entre les faces exposées et ombragées (~ 20°C d'écart soit ~ 2°C/cm). Enfin cette expérimentation a montré des différences de dynamique entre la périphérie et le cœur du tronc avec des gradients radiaux de plus de 3°C/cm et un décalage temporel, piloté par la diffusion thermique, entre la dynamique à cœur et en périphérie de près de 3h30. Fait remarquable, le cœur du tronc est ainsi gelé au midi solaire (-3°C) alors que l'air et les températures de surfaces ont des températures supérieures à 5°C. D'une manière globale, cette expérimentation a révélé une

forte dynamique spatiale et temporelle pilotée par le rayonnement (course du soleil) et la diffusion thermique (volume tronc) [MS 93].

Ces observations montrent clairement la variabilité spatiale et temporelle des températures des organes végétaux et leurs intensité et durée importantes. Ces dynamiques thermiques sont complexes car variables en temps et en espace et sont intiment liées aux variations des flux de surface (comme la course du soleil dans le ciel au cours de la journée), et aux aspects structuraux (ici la forme, i.e. le volume pour les fruits et les troncs par exemple). Ces observations confortent également la nécessité d'aller vers une modélisation afin d'estimer les conditions environnementales générant de tels gradients et leurs occurrences. En effet si les expérimentations permettent de les quantifier, elles permettent très rarement d'expliciter les facteurs responsables de cette variabilité : couche limite foliaire, transpiration, rayonnement ou structure, et d'en formaliser les liens [55]. Certains auteurs se sont explicitement interrogés sur les processus physiques (couche limite) ou fonctionnels (conductance stomatique) de ces gradients [18, 56]. Ainsi et de mon point de vue, l'approche expérimentale est nécessaire mais n'est pas entièrement satisfaisante car elle présente des limites. Elle ne permet pas d'embrasser toute la variabilité. Il n'est pas envisageable d'observer toutes les feuilles d'un arbre par exemple, et elle ne permet pas facilement de quantifier le rôle précis des différents termes du bilan thermique ou de prévoir l'évolution de cette variabilité. La modélisation, même si elle présente elle aussi des limitations, notamment sur les échelles et les processus simulés, permet d'aller dans ce sens, et constitue, selon moi une suite logique à l'observation.

Dans la littérature de nombreux modèles traitant de la température d'organe(s) ont été développés. La plupart ont été dédiés aux feuilles car elles sont le siège des échanges gazeux (H_2O, CO_2) et d'énergie entre la plante et l'atmosphère, et beaucoup moins aux autres organes constitutifs d'une plante : bourgeons, fruits, ou rameaux. Étant donné l'importance de la température foliaire sur le fonctionnement des plantes, elle a été incluse dans des modèles qui calculent les échanges de carbone et d'eau entre les plantes et l'atmosphère [57-60] ainsi que les conditions microclimatiques locales pour les insectes herbivores [61, 62][MS 24]. Au niveau des autres organes, citons des modèles d'apex du maïs [63], l'épi du maïs [64, 65], du capitule du tournesol [66], et les fruits [53, 67, 68] . Toutefois ces modèles estiment seulement une moyenne spatiale de la température de l'organe comme indicateur de la température de surface et ne permettent pas de prédire la distribution spatiale de la température dans ou à la surface de ces organes. Cette absence de modèles prenant explicitement en compte la variabilité spatiale à l'échelle d'un organe s'explique par la nécessité de spatialiser également les processus qui pilotent ses gradients. Le point saillant de mon travail a été d'étudier cette spatialisation, à la fois

pour les fruits et pour les feuilles, sur deux aspects différents : la diffusion thermique dans le cas des fruits et la prise en compte de la forme et la spatialisation de la couche limite pour les feuilles.

J'ai débuté ce travail en 2005 sur des organes tridimensionnels comme les fruits dans le cadre du pari scientifique sur la température des fruits [MS 21, 25, 27, 29, 30] et les troncs [MS 93, encadrements de stagiaires de MII), puis je me suis orienté il y a quelques années sur les feuilles qui sont plutôt des organes quasi-bidimensionnels (ANR MicroCliMite – [MS 14]). Ce choix initial des organes volumiques présentait (et présente toujours) une originalité et une nouveauté par rapport à la majorité des études antérieures et actuelles sur la température des organes qui concernent essentiellement les feuilles. Le caractère volumique a en effet pour conséquence la présence d'un terme de diffusion thermique au sein de l'organe qui vient modifier le bilan d'énergie et induit un délai dans la transmission de la chaleur et un filtrage des fluctuations externes. Ce processus est largement connu, notamment en science du sol où les températures des horizons profonds sont impactées par les variations mensuelles ou annuelles, alors que les horizons supérieurs suivent les fluctuations horaires ou journalières atmosphériques, mais la prise en compte de cette diffusion induit une formalisation un peu plus complexe du système physique à résoudre avec la présence d'équations aux dérivées partielles.

Organes volumiques – Modèle de fruit et tronc

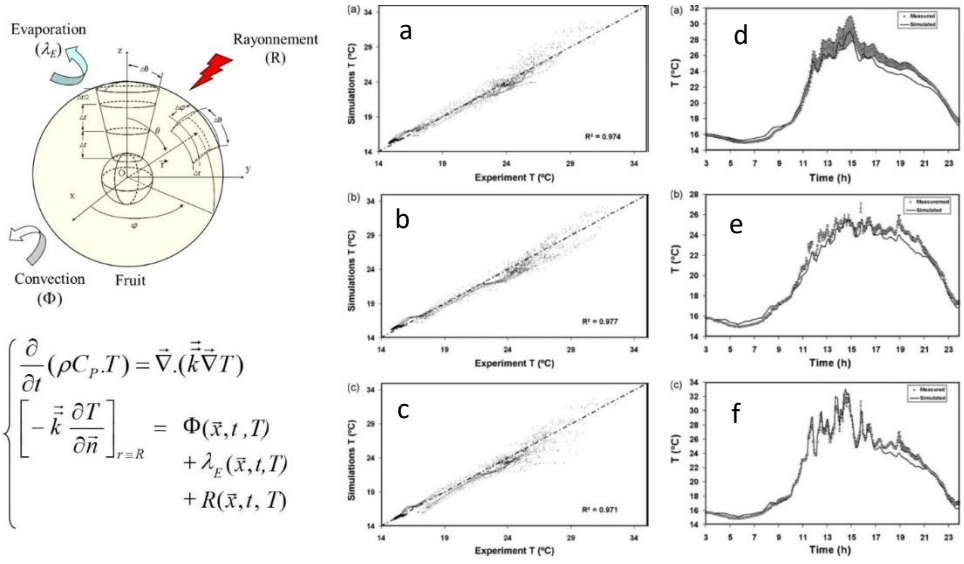


Figure 5 : Modèle 3D de fruit (maillage et équation) et comparaison entre simulation et mesure des températures pour (a) des pommes Golden, (b) des pommes Redchief, et (c) des pêches. Dynamiques thermiques simulées et mesurées à la surface de la partie ombragée (e), exposée (f) et au cœur du fruit (d) d'une pomme Redchief [MS 30].

Sur les fruits, et à ma connaissance, seuls les modèles proposés par Poppendiek et al. (1953) [67], Thorpe et al. (1974) [53] et Smart et al. (1976) [68] ont permis une avancée significative en abordant la question de la modélisation des gradients thermiques au sein des organes. Cependant, ces modèles supposent des conditions aux limites constantes et homogènes à la surface du fruit

[68], ou des conditions et des propriétés thermiques constantes à l'intérieur du fruit [53]. L'utilisation de conditions aux limites constantes n'est pas compatible avec une situation de vergers où le microclimat fluctue. Un modèle pertinent, d'un point de vue de sa capacité de prédiction, devrait prendre en compte ces variations. Pour répondre à cette question, j'ai repris un modèle numérique de la conduction thermique dans un fruit ellipsoïdal développé initialement par l'UMR Environnement et Grandes Cultures (M. Chelle). Les conditions aux limites et les coefficients de diffusivité peuvent varier dans l'espace et dans le temps pour imiter les variations des conditions atmosphériques et les changements de la conductivité thermique des tissus à l'intérieur des fruits (Figure 5). Le système à résoudre est formellement assez simple puisqu'il s'agit d'une équation de diffusion avec des conditions limites en surface de type flux (Neumann) (Eq 1 et 2).

La résolution a été formulée en volumes finis (1er ordre en temps et 2nd ordre en espace) et écrite en C++. J'ai repris ce travail et amélioré les schémas numériques en introduisant une formulation implicite de la résolution temporelle (gradient biconjugué [69]) afin de s'affranchir d'une condition de stabilité. J'ai également estimé le bon comportement du modèle en le comparant aux données expérimentales issues du projet. La pertinence du modèle a été démontrée pour différents fruits à pépins (pomme) et à noyaux (pêche) (RMSE < 1°C, Figures 5a, 5b, 5c) aussi bien pour la température de surface (Figures 5e, 5f) qu'au centre des fruits (Figure 5d). L'utilisation de ce modèle a permis de montrer que la dynamique thermique de surface est fortement corrélée temporellement au microclimat. Nous avons montré que les déterminants de la température des fruits sont les termes de convection (Φ) et de rayonnement net (R). Le terme de transpiration cuticulaire (λ_E) est négligeable et le terme de diffusion ne joue qu'un rôle de tampon et d'amortissement des fluctuations de température de surface. Une conséquence importante est que les dynamiques thermiques des fruits vont être fortement déterminées par l'agencement spatial du feuillage (densité, orientation) puisqu'il va piloter les gradients des flux radiatifs et convectifs.

Plusieurs années après, j'ai collaboré avec l'UR Fonctionnement agroécologique et performances des systèmes de culture horticoles (HortSys – La Réunion) et l'UR Plantes et Systèmes de Culture Horticoles (PSH - Avignon), dans le cadre de la thèse de Nordey Thibault afin qu'il reprenne ce modèle [MS 21]. L'objectif était d'estimer l'impact de la croissance du fruit et des changements des propriétés thermiques liées notamment à la teneur en eau des tissus (densité, capacité calorifique, conductivité thermique) mais aussi à la maturation (réflectance corticale et conductance à la vapeur d'eau) sur les variations spatio-temporelles de la température des fruits. Dans ces travaux le modèle a été complètement réécris sous R, et appliqué à la mangue.

Les résultats montrent que le calcul d'une température moyenne d'un fruit en croissance, nécessaire, par exemple, pour le calcul de la somme des temps thermiques, peut être réalisé sans tenir compte de l'évolution des propriétés du fruit. Cependant, les changements des propriétés d'un fruit au cours de son développement induisent des changements dans la distribution de la température à l'intérieur du fruit et de sa transpiration globale (Figure 6).

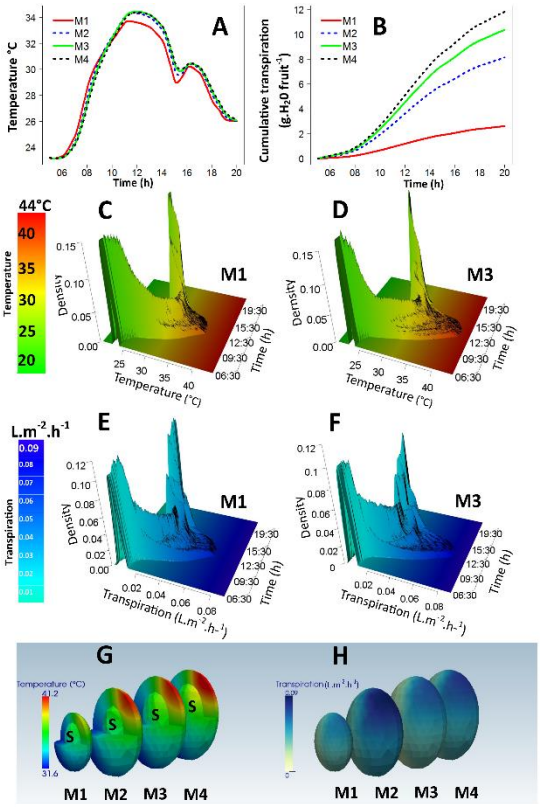


Figure 6 : Evolution quotidienne moyenne des températures (A) et des pertes d'eau cumulées par transpiration (B) pour les fruits aux stades de maturité M1, M2, M3 et M4, ainsi que les fonctions de distribution de probabilité des températures simulées (C et D) et des taux de transpiration simulés (E et F) à l'intérieur du fruit aux stades de maturité M1 et M3, respectivement, sont représentées. À un moment donné, la courbe a une aire totale de un. La distribution spatiale des températures (G) et des pertes d'eau par transpiration (H) à 12h00 a été obtenue à partir de simulations d'un fruit aux quatre stades de maturité, M1 à M4. S correspond au compartiment du noyau [MS 21]

Organes quasi 2D – Modèle de feuilles

Mon travail sur la variabilité spatiale de la température des feuilles est arrivé assez naturellement suite à mon travail sur les fruits et troncs. Il a émergé suite à des discussions entreprises avec des entomologistes de l'UMR IRBI de Tours, sur la variabilité spatiale des microhabitats thermiques foliaires ressentis par les insectes, la plupart ectothermes, au sein d'une frondaison. A travers cette collaboration, il s'agissait d'abord de comprendre le déterminisme des gradients de température observés. Sont-ils pilotés par la structure de la feuille, sa physiologie (conductance stomatique), par la présence du ravageur ou par la variabilité spatiale du microclimat à la surface de la feuille (couche limite) ? J'ai privilégié une approche de modélisation car elle me permettrait de prédire cette variabilité en fonction des caractéristiques structurelles et fonctionnelles d'une feuille et du microclimat environnant et d'en hiérarchiser le poids respectif (Figure 7). Au niveau cognitif, ce travail a apporté une nouveauté par rapport à la littérature existante. En effet les liens entre la température moyenne d'une feuille, son environnement et sa réponse fonctionnelle sont connus, maîtrisés et modélisés depuis plusieurs décennies [12]. Par contre le déterminisme des gradients thermiques observés était peu connu car sa compréhension induit la nécessité de spatialiser la structure d'une feuille et les composantes du bilan thermique (Eq 4, 5 et 6) et ainsi de mobiliser des concepts de physique (transferts thermiques, couche limite) et numériques (discrétisation des équations, méthodes de résolution). Le point saillant et novateur a été d'analyser et de proposer un cadre d'intégration du développement de la couche limite à la surface de la feuille dans une approche de modélisation simple. La simplicité ici étant de rester sur des concepts de bioclimatologie maîtrisés et ne pas investir le champ de la mécanique des

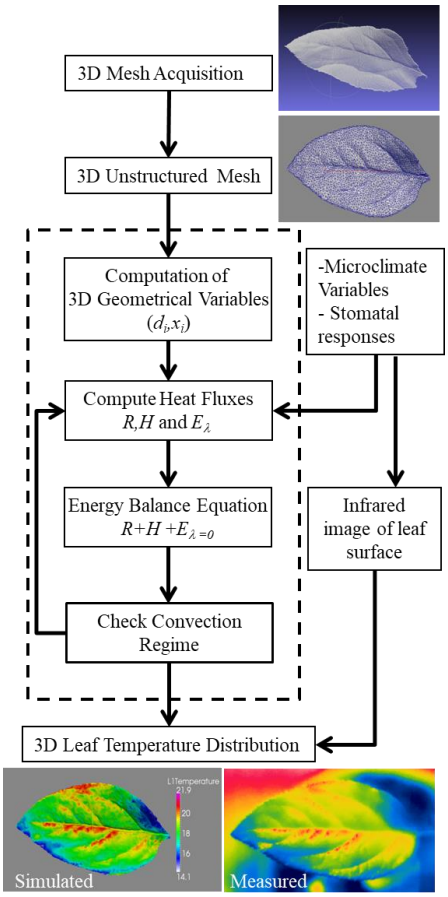


Figure 7: Modèle 3D de feuille – Schéma de principe de la spatialisation des processus et de la température foliaire [MS 12].

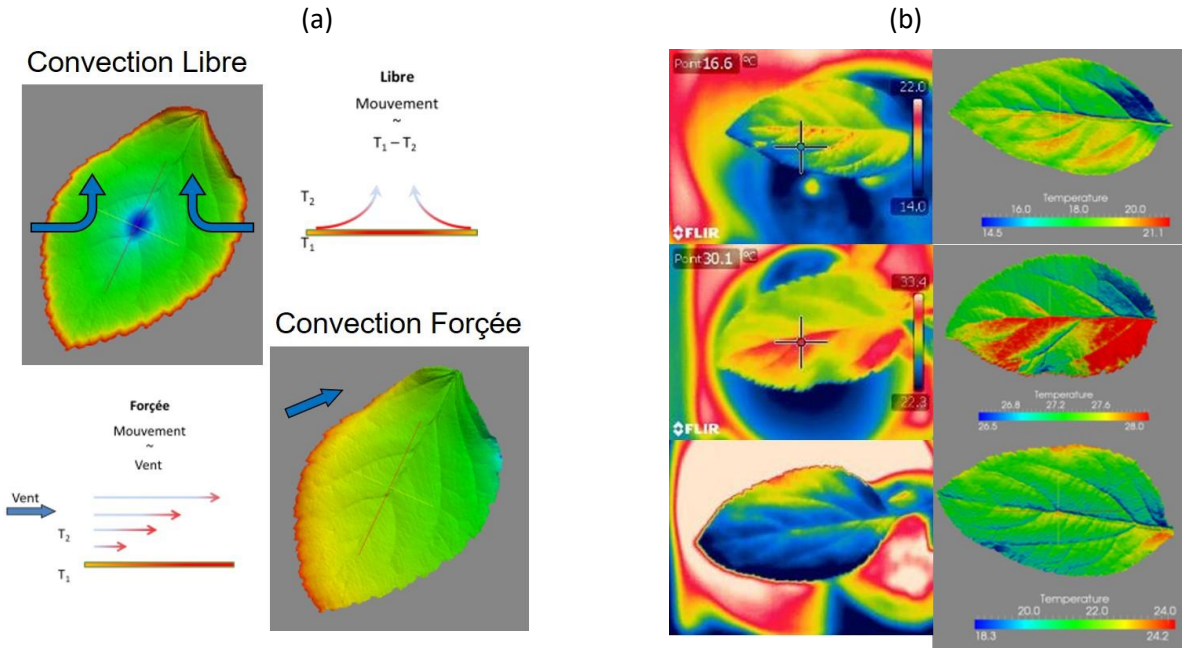


Figure 8: Modèle 3D de feuille – Illustration de l'intégration de la couche limite foliaire et comparaison des patterns de température simulés et mesurés par thermographie infrarouge [MS 12].

fluides en résolvant numériquement l'écoulement autour d'une feuille. Ce travail a été développé en autonomie sur la partie modélisation biophysique et a permis de mettre en place un outil de modélisation écrit en langage Python. Par envie personnelle, le développement de cet outil a également été l'opportunité pour moi d'acquérir des connaissances en calcul vectoriel sur carte graphique, et le bilan d'énergie est ainsi vectorisé sur carte graphique Nvidia via l'utilisation du langage PyCUDA [70]. Comparativement à un calcul monoprocesseur (Intel Xeon 2 procs 2.4 Ghz), l'utilisation de cœurs graphiques (192 cœurs) a diminué le temps d'exécution d'un facteur 18.

Il n'est pas opportun ici de rentrer dans les détails du modèle mais d'évoquer le point le plus innovant : le traitement du flux de chaleur sensible (*H*) (Eq. 5) via la spatialisation de la couche limite à la surface de la feuille et les différents types d'écoulement qui peuvent survenir pour une feuille *in natura*. En introduisant le nombre adimensionnel de Nusselt ($Nu = h.L/k$ ou L *(m)* est une longueur caractéristique de la feuille, et k *(W.m^{-1}.K^{-1})* la conductivité thermique de l'air), qui compare les effets conductif et convectif. Ce nombre permet de caractériser le type de transfert thermique entre un fluide et une paroi, et son utilisation conduit à la formulation du flux de chaleur sensible local comme suit:

$$H(x) = Nu(x)\frac{k}{L}(T(x) - T_{air}) \qquad \text{(Eq. 7)}$$

La nature de la couche limite foliaire (libre, forcée ou mixte) dépend de la force qui anime l'écoulement, c'est-à-dire le gradient de température $(T(x) - T_{air})$ ou de la quantité de mouvement de l'écoulement extérieur (lié à sa vitesse) (Figure 8a). Elle peut être traitée dans le

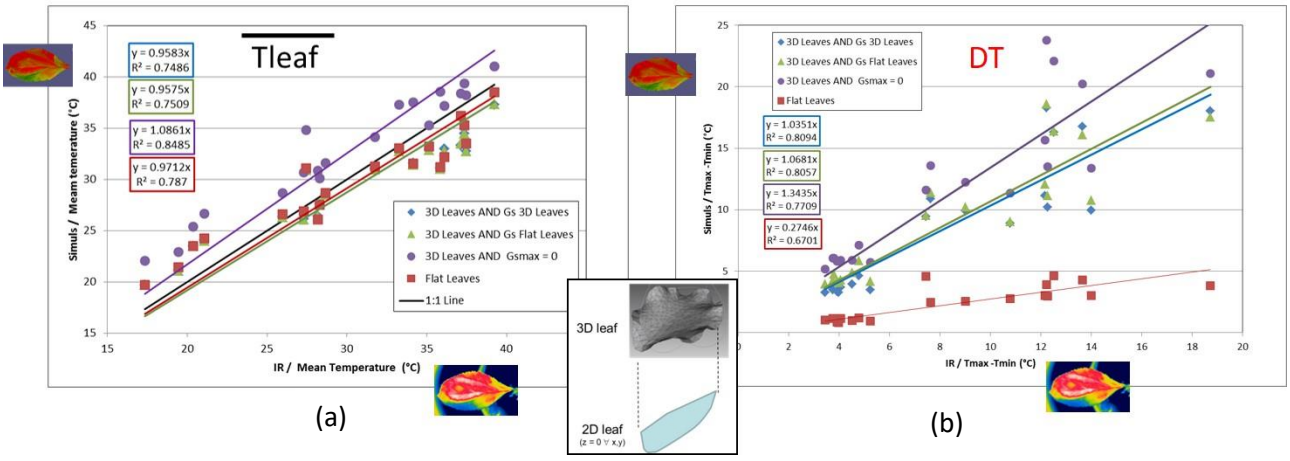


Figure 9: Comparaison des températures simulées avec les températures mesurées par imagerie infrarouge. (a) moyenne spatiale à la surface de la feuille, et (b) hétérogénéité maximale (Tmax – Tmin) à la surface [MS 12]

modèle de feuille 3D en spécifiant une formulation analytique du nombre de Nusselt local *Nu(x)*. Dans le cas d'une convection forcée, le nombre de Nusselt local a été choisi suivant Wigley & Clark (1974) [56] ($Nu^{Forced}(x) = 0.045\ Pr^{\frac{1}{3}} Re_x^{0.85}$ où *Pr* est le nombre de Prandtl qui compare les propriétés de diffusivité de la quantité de mouvement et de la chaleur, $Re_x = \frac{Ux}{v}$ le nombre de Reynolds local qui compare les forces d'inertie et visqueuses d'une fluide, U (m.s^{-1}) est la vitesse du vent, v (m² s^{-1}) est la viscosité cinématique de l'air, et x la distance au bord d'attaque de la feuille). Dans le cas d'une convection libre, j'ai considéré que la littérature ne fournissait pas d'expression satisfaisante car une feuille peut être vue comme une surface mince chauffée où les échanges se font simultanément via les faces inférieure et supérieure. J'ai ainsi fait une étude numérique suivant le travail de Wei et al. (2002) [71] afin d'estimer les distributions spatiales des coefficients de convection de chaleur libre pour les faces inférieure (Nu_{Lower}^{Free}) et supérieure (Nu_{Upper}^{Free}) d'une surface mince [MS57]. Pour ce faire une feuille avec une faible conductivité thermique de 0,4 W m^{-1} K^{-1} a été considérée [72]. Ce calcul a été effectué à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics (version 4.3a). Suivant le formalisme de Wei et al. (2002) [71], les nombres de Nusselt peuvent être estimés par des fonctions polynomiales de la distance relative du barycentre géométrique de la plaque :

$$\begin{cases} Nu_{\text{Free}}^{\text{Upper}} / \overline{Nu_{\text{Free}}^{\text{Upper}}} = \sum_{j=0}^{6} a_j \left| \frac{d_i}{2} \right|^j \\ Nu_{\text{Free}}^{\text{Lower}} / \overline{Nu_{\text{Free}}^{\text{Lower}}} = \sum_{j=0}^{5} b_j \left| \frac{d_i}{2} \right|^j . \end{cases} \quad \text{(Eq. 8) avec} \quad \begin{cases} \overline{Nu_{\text{Free}}^{\text{Upper}}} = 0.5422.(Ra^{**})^{0.1515} \\ \overline{Nu_{\text{Free}}^{\text{Lower}}} = 0.3586(Ra^{**})^{0.1855} . \end{cases} \quad \text{(Eq. 9)}$$

Où $\overline{Nu_{Lower}^{Free}}$ et $\overline{Nu_{Upper}^{Free}}$sont les coefficients d'échange moyens intégrés sur les faces inférieure et supérieure respectivement ($\bar{X} = \frac{1}{S}\iint X dS$). Ces valeurs moyennes peuvent être à leur tour exprimées à partir du nombre de Rayleigh, *Ra* qui compare les transferts thermiques convectif et conductif, de la feuille [71].

Dans le cas d'une convection mixte, i.e. qui combine à la fois des convections forcée et libre, une revue des données théoriques et expérimentales a suggéré que le nombre de Nusselt pour le régime de convection mixte peut être exprimé comme suit : $Nu^{Mixed} = \left[(Nu^{Free})^n + (Nu^{Forced})^n\right]^{1/n}$ [38, 73]. Suivant [73] , le paramètre n=3 a été choisi dans le modèle de feuille 3D. Ces relations permettent d'établir le développement de la couche limite foliaire en fonction de l'écoulement considéré en prenant en compte l'orientation du vent moyen sans avoir à effectuer un calcul exhaustif de l'écoulement (Figure 8a).

La validation du modèle a été effectuée à l'aide d'une expérimentation dédiée sur des feuilles de pommiers installés en chambre de culture et soumis à des rayonnements et températures variées [MS 12]. Les températures de surface de 20 feuilles ont été mesurées par thermographie infra-rouge et scannées afin d'obtenir leurs microtopographies 3D (Figure 8b). Les résultats montrent que le modèle restitue bien la température moyenne et le gradient thermique observé (R^2*=0.76, y = 0.96 x*, Symboles violet - Figures 9a, 9b). Une fois validé, l'utilisation du modèle a permis de mettre en évidence le rôle majeur de la structure tridimensionnelle de la feuille via les aspects radiatifs sur les gradients thermiques à sa surface (Figure 9b). La couche limite joue un rôle effectif dans les gradients thermique mais de façon moindre. Enfin la régulation stomatique, quant à elle, impacte principalement la température moyenne et a un rôle anecdotique sur les gradients (Figure 9a). Ces résultats confirment ainsi que les modèles de température de feuille visant explicitement à simuler une température moyenne de feuille ne nécessite pas d'information spatialisée à sa surface. La nécessaire spatialisation de la structure n'intervient que dans le cadre de la recherche d'une variabilité spatiale à sa surface. Cette variabilité spatiale est importante à prendre en compte dans le cadre de l'étude des microhabitats thermiques des insectes foliaires notamment endophytes [19]. Sur ce point un travail conséquent reste encore à fournir pour le passage de l'échelle foliaire à l'échelle du couvert afin d'être capable de fournir une estimation de la variabilité spatiale des températures à la surface d'une feuille au sein d'un houppier complet. Pour atteindre cette objectif, les questions de caractérisation des traits foliaires à l'échelle du houppier [74, 75], de la forme des feuille [MS 28] et du développement de la couche limite dans le cas de feuilles présentant des angles d'inclinaison importants sont certainement des points clefs à appréhender.

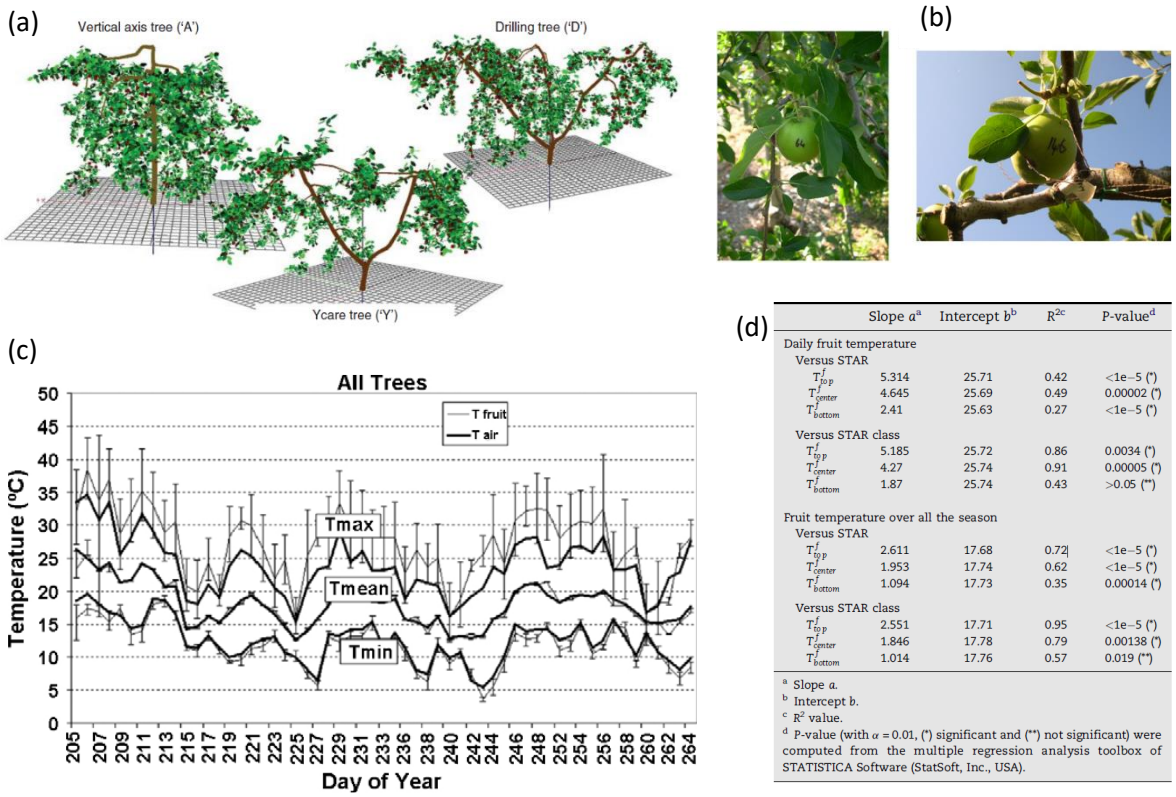
1.5. Température à l'échelle de l'arbre : variabilité spatiale et temporelle

La connaissance des processus qui pilotent la dynamique thermique des organes est une étape importante et nécessaire dans la compréhension du déterminisme des températures des organes. Comme l'indique le bilan d'énergie (Eq. 2), la principale source de ces dynamiques thermiques est le rayonnement qui va être contrebalancé par les flux de chaleur sensible, latente et d'autres. Le rayonnement est ainsi la composante du bilan d'énergie qui est la mieux documentée et formalisée (loi exponentielle décroissante (Beer Lambert) en fonction de traits foliaires comme le clumping, la densité et leurs angles d'inclinaison [76]. La difficulté majeure à l'échelle d'un houppier est que tous ces flux varient fortement spatialement et sont intimement liés entre eux via leur dépendance commune à la température. Il est également important de noter que tous ces flux fluctuent dans le temps en fonction des conditions incidentes, de la porosité des houppiers [77, 78] ou son mouvement (thèse Loïc Tadrist, [MS 10]). Les liens entre structure des couverts et fonctionnement ou développement des ravageurs a conduit à tout un corpus de réflexion et de mise en œuvre pratique de la conduite des couverts pour en optimiser la production ou diminuer la pression d'un ravageur [79]. Ces pratiques courantes en arboricultures fruitières visent notamment) et de réguler les relations sources-puits (éclaircissage) entre les feuilles (sources de notamment) et de réguler les relatons sources-puits (éclaircissage) entre les feuilles (sources de carbone – photosynthèse) et les fruits (puits de carbones) en régulant la « charge » en fruits. Dans ce contexte de manipulation du microclimat via le levier architectural, je me suis intéressé à la question des variabilités spatiale et temporelle des conditions microclimatiques locales et des conséquences sur la distribution des températures d'organe à l'échelle d'un houppier.

Deux approches peuvent être mobilisées pour explorer/révéler ces distributions intra houppier. La plus simple consiste à explorer l'espace des possibles des températures à partir de la connaissance des intervalles de variations du microclimat au sein d'un houppier comme dans le cas d'une analyse de sensibilité par exemple [80]. Toutefois cette solution ne prend pas en compte explicitement l'auto-ombrage entre feuilles ou l'ombrage des feuilles sur les fruits, limitant ainsi la portée des conclusions. Il est ainsi impossible d'aborder des questions finalisées comme les liens entre conduites des fruitiers et qualité des fruits ou développement des ravageurs. L'autre solution consiste à expliciter les processus d'auto-ombrage par la simulation. L'existence au sein de mon UMR de rattachement de 2 modèles : un modèle de fonctionnement et de microclimat spatialisé basé sur une approche de milieu continu (RATP [60]) et un modèle d'éclairement basé explicitement sur la géométrie 3D des houppiers (VegeSTAR [81]) m'ont

permis d'avancer sur les questions du déterminisme de la température des fruits [MS 25, 29] et des feuilles [MS 6, 14] à l'échelle d'un couvert.

Distribution spatiale des températures de fruits



(d)

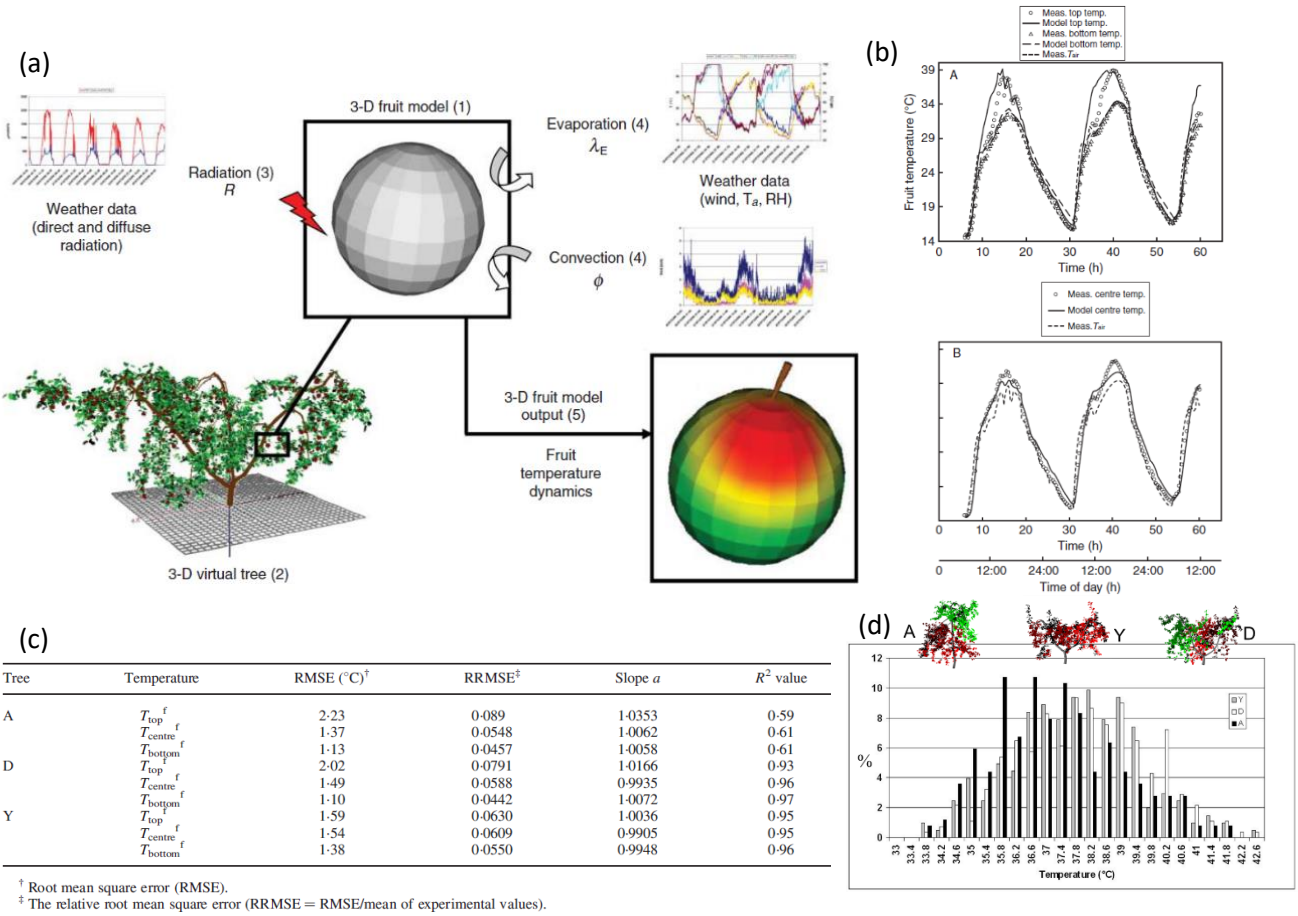
	Slope a[a]	Intercept b[b]	R^2[c]	P-value[d]
Daily fruit temperature				
Versus STAR				
T^f_{top}	5.314	25.71	0.42	<1e−5 (*)
T^f_{center}	4.645	25.69	0.49	0.00002 (*)
T^f_{bottom}	2.41	25.63	0.27	<1e−5 (*)
Versus STAR class				
T^f_{top}	5.185	25.72	0.86	0.0034 (*)
T^f_{center}	4.27	25.74	0.91	0.00005 (*)
T^f_{bottom}	1.87	25.74	0.43	>0.05 (**)
Fruit temperature over all the season				
Versus STAR				
T^f_{top}	2.611	17.68	0.72	<1e−5 (*)
T^f_{center}	1.953	17.74	0.62	<1e−5 (*)
T^f_{bottom}	1.094	17.73	0.35	0.00014 (*)
Versus STAR class				
T^f_{top}	2.551	17.71	0.95	<1e−5 (*)
T^f_{center}	1.846	17.78	0.79	0.00138 (*)
T^f_{bottom}	1.014	17.76	0.57	0.019 (**)

[a] Slope a.
[b] Intercept b.
[c] R^2 value.
[d] P-value (with $\alpha = 0.01$, (*) significant and (**) not significant) were computed from the multiple regression analysis toolbox of STATISTICA Software (StatSoft, Inc., USA).

Figure 10: (a) Maquettes 3D de pommiers (Golden) reconstruits par digitalisation et représentant 3 modes de conduites différentes. (b) Photos de thermocouples insérés dans des pommes pour en mesurer les températures de surface et inerne. (c) Dynamiques des températures journalières moyenne, maximale et minimale des fruits et de l'air. (d) Corrélations obtenues entre température des fruits et l'éclairement qu'ils perçoivent estimé par le STAR (Silhouette to Total Area Ratio. [MS 27]

Le projet innovant de 2005 a permis d'avancer sur la connaissance des gradients intra-fruits mais ces résultats avaient été obtenus sur fruits détachés (Figures 5a) et donc ne permettaient pas de caractériser la variabilité des températures de fruits dans un houppier. En 2006, j'ai ainsi profité d'un projet de collaboration, mis en place en 2004 par un collègue, Hervé Sinoquet, avec l'Agroscope de Changins (Suisse) sur l'étude des relations entre la conduite des arbres et la qualité des fruits, pour mettre en place une expérimentation dédiée sur la Station fédérale de Changins (Centre des Fougères) [82]. Dans le cadre de ce projet 3 groupes de six pommiers Golden Delicious âgés de treize ans et conduits respectivement en axe vertical (1 seul axe), Ycare (2 charpentières) et Drilling (3 charpentières) ont été digitalisés en 2004 et 2005 au Centre des Fougères à Conthey (Figure 10a). Le principe de mesure par digitalisation permet d'obtenir une reproduction tridimensionnelle des organes des arbres sur lesquelles des analyses de typologie de pousses ou d'éclairement peuvent être entreprises et caractériser l'impact d'un mode de conduite

sur les dynamiques architecturales par exemple [82]. A partir de ces mêmes arbres, les objectifs en 2006 étaient de (i) caractériser la variabilité spatiale des températures de fruits dans un houppier et de la relier à la structure des arbres et au microclimat local [MS 27], et (ii) de proposer un cadre de modélisation de la dynamique thermique des fruits dans un houppier [MS 25]. Pour cela 12 fruits par arbres (1 par mode de conduite, soient 36 fruits au total) choisis dans 3 groupes relativement à leur exposition au rayonnement solaire : très exposés, moyennement exposés, et très ombragés. Chacun des fruits fut équipé de 3 thermocouples pour en mesurer les températures de surface (1 face exposée au soleil et 1 face ombragée) et la température interne avec une fréquence d'acquisition de 20 minutes pendant les mois de juillet et aout (Figure 10b). Les arbres portant les fruits ont été de nouveau digitalisés en 2006 et chaque fruit positionné spatialement dans la couronne et catégorisé suivant le rayonnement reçu. Le rayonnement reçu est estimé via le calcul du STAR (Silhouette to Total Area Ratio) qui est un indicateur de la proportion de la surface d'un objet recevant du rayonnement solaire [83]. Ces données ont été analysées à différentes échelles spatiales (fruit ou arbre) et temporelle (heure, jour et mois). A l'échelle de l'arbre (fruit moyen) et sur des moyennes journalières ou plus, comme c'est généralement le cas dans les études menées classiquement sur le développement des fruits ou des ravageurs, la température des fruits égale la température de l'air. A une échelle infra journalière, de grandes



Tree	Temperature	RMSE (°C)†	RRMSE‡	Slope a	R^2 value
A	T_{top} f	2·23	0·089	1·0353	0·59
	T_{centre} f	1·37	0·0548	1·0062	0·61
	T_{bottom} f	1·13	0·0457	1·0058	0·61
D	T_{top} f	2·02	0·0791	1·0166	0·93
	T_{centre} f	1·49	0·0588	0·9935	0·96
	T_{bottom} f	1·10	0·0442	1·0072	0·97
Y	T_{top} f	1·59	0·0630	1·0036	0·95
	T_{centre} f	1·54	0·0609	0·9905	0·95
	T_{bottom} f	1·38	0·0550	0·9948	0·96

† Root mean square error (RMSE).
‡ The relative root mean square error (RRMSE = RMSE/mean of experimental values).

Figure 11: (a) Principe de modélisation mis en place pour la simulation de la dynamique thermique des fruits prenant en compte la structure des houppiers et la position des fruits et les conditions météorologiques. (b) Comparaison des dynamiques thermiques simulées (traits) avec les mesures (symboles) pour (A) la surface supérieure (T_{top}), la surface inférieure (T_{bottom}), et (B) le centre des fruits (T_{center}) d'un fruit relativement bien éclairé. (c) Relations entre température moyenne journalière simulée et éclairement (STAR) pour la surface supérieure (T_{top}), la surface inférieure (T_{bottom}), et le centre des fruits (T_{center}). (d) Comparaison des distributions des températures moyennes journalières des fruits entre les 3 modes de conduites [MS 25]

variabilités inter-fruit et intra-fruit ont été mesurées avec des écarts de plus de 5°C entre les températures des fruits et l'air et des gradients intra-fruits qui peuvent atteindre 5°C également (Figure 10c). Pour essayer d'expliquer une telle variabilité au sein d'un même arbre et notamment intégrer les architectures contrastées des 3 arbres dans l'analyse, l'exposition des fruits à la lumière a été prise en compte. Les très bonnes corrélations entre température et STAR montrent effectivement que l'exposition solaire est un bon déterminant des températures des fruits (Figure 10d). Ce travail montre également qu'il est possible connaissant les répartitions spatiales du feuillage et des fruits d'approximer les températures des fruits.

Toutes les données acquises au cours de ce lourd travail expérimental ont également été mises à profit pour valider une démarche de modélisation innovante des dynamiques thermiques des fruits permettant de prendre en compte explicitement le mode de conduite des arbres, le climat, et les propriétés thermiques des fruits [MS 25]. La méthodologie développée a consisté à utiliser le modèle organe centré développé dans le cadre du projet innovant pour chacun des fruits d'une

maquette d'arbre 3D en prenant en compte l'ombrage généré par les feuilles, i.e. en définissant pour chaque fruit et à chaque instant les termes du bilan d'énergie à leur surface (Eq 1 et 2). La pertinence de cette méthodologie a été estimée en simulant les dynamiques thermiques des fruits observés en 2006 sur le Centre des Fougères (Suisse) à partir des maquettes 3D des pommiers (Figure 11a). Les résultats montrent que les simulations prévoient assez fidèlement les tendances avec des RMSE variant de 1°C à 2.3°C, des pentes de régression proche de 1 et des R^2 variant de 0.6 à 0.97 (Figure 11c). Les dynamiques thermiques situées de la surface supérieure des fruits (T_{top}) étant les moins bien restituées par le modèle comparativement aux dynamiques interne (T_{center}) et de la surface inférieure i.e. à l'ombre (T_{bottom}). L'utilisation plus avant de cette approche de modélisation permet alors de comparer les modes de conduite sur la variabilité de traits thermiques comme la distribution des températures maximale des fruits (Figure 11d) pour adresser des questions plus finalisées comme les brûlures corticales. D'une manière plus globale et au-delà de la pertinence des prédictions, ce travail a montré les difficultés d'une approche de modélisation prédictive organe centré où tous les organes sont explicitement spatialisés. En effet et comparativement à l'approche milieu continu utilisée pour le feuillage, une grande partie des biais de prédiction proviennent de la caractérisation de l'environnement aussi bien structurel (distribution foliaire) que climatique (vent, rayonnement) plus que de la modélisation des processus (ici diffusion thermique). Ces résultats militent pour la mise en place de travaux afin de mieux prédire les variabilités spatiales et temporelles des composantes du microclimat qui interviennent dans le bilan d'énergie (Eq 2). Cet objectif passe notamment par une meilleure caractérisation la structure des couverts via le développement ou l'utilisation d'outil d'acquisition et de reconstruction plus performants comme le Lidar qu'il soit terrestre ou aéroporté. Ce travail pose aussi question sur l'échelle de temps d'observation des processus thermiques. En effet et sur les temps courts, i.e. infra-horaire, les fluctuations du vent (turbulence) et du rayonnement vont devoir être prises en compte et donc caractérisées. La formalisation de ces fluctuations n'est pas triviale. J'y reviendrai dans le cadre de mon projet. De même le vent va également modifier de la structuration spatiale du houppier et venir, indirectement, conditionner les fluctuations de rayonnement au sein du houppier (thèse Loïc Tadrist, [MS 10]).

Distribution spatiale des températures foliaires

J'ai abordé cette question dans le cadre du projet ANR MicroClimite portant sur la caractérisation des microhabitats thermiques des insectes et des rôles respectifs du climat, de la structure arborée, et de la réponse transpiratoire foliaire sur la détermination de ces microchabitats thermiques. Dans le cadre de ce travail j'ai collaboré avec le Pr A. Woods (Université du Montana) que j'ai invité au sein de l'UMR PIAF en 2017 [MS 6]. Pour mener à bien ce projet,

une approche purement numérique a été menée en se basant sur le modèle RATP pour sa capacité à relier structure, microclimat, transpiration et température foliaire afin de mieux cerner l'influence respective du climat, de la structure et de la physiologie sur la distribution des températures foliaires. Cette analyse a porté sur le pommier, *Malus Domestica*, dont nous avons acquis depuis plusieurs années de nombreuses données d'architecture notamment dans le cadre de la thèse d'Alexandre Leca, sous forme de maquettes 3D, et de fonctionnement sur des variétés différentes [82].

L'analyse a consisté à effectuer une analyse de sensibilité basée sur la méthode de Morris [84] en faisant varier 13 variables liées aux paramètres climatiques (rayonnement total incident, rapport rayonnement diffus sur direct, température d'air et hygrométrie de l'air, vitesse du vent), à la structure des houppiers (densité foliaire et angles d'inclinaison), et à la réponse stomatique (6 paramètres) sur des gammes de variations normalement rencontrées, et en considérant un arbre isolé et un couvert continue (Figures 12a et 12b). Pour utiliser cette analyse de Morris, 5600 simulations ont été effectuées afin de croiser au maximum tous les paramètres et d'explorer au mieux les gammes de variations. Pour chacun des paramètres, l'analyse de Morris calcule deux indicateurs, $\mu*$ et σ, qui se réfèrent, respectivement, à l'intensité de l'effet global du paramètre sur les valeurs de sortie de la simulation et à l'intensité de ses interactions avec les autres paramètres [85]. Les résultats ont été analysés en considérant 2 groupes de feuilles : celles visibles par le ciel, i.e. visibles en télédétection, (Top voxels – Figure 12c) et toutes les feuilles constituant la canopée (All voxels – Figure 12c). Très globalement ces résultats montrent clairement que, quel que soit le groupe considéré, le forçage climatique est le principal déterminant de la moyenne de la température foliaire et de sa variabilité spatiale à l'échelle du feuillage (macro échelle). Plus intéressant est la sensibilité, à cette macro-échelle, plus grande de la distribution foliaire de la température à la structure du couvert (LAD, angles foliaire) qu'à la réponse stomatique. Ce résultat fait écho aux résultats obtenus à l'échelle foliaire où rayonnement et géométrie de la feuille sont également de première importance devant la réponse stomatique (micro échelle – Figure 9b). Une analyse plus détaillée des simulations montrent une forte hétérogénéité des

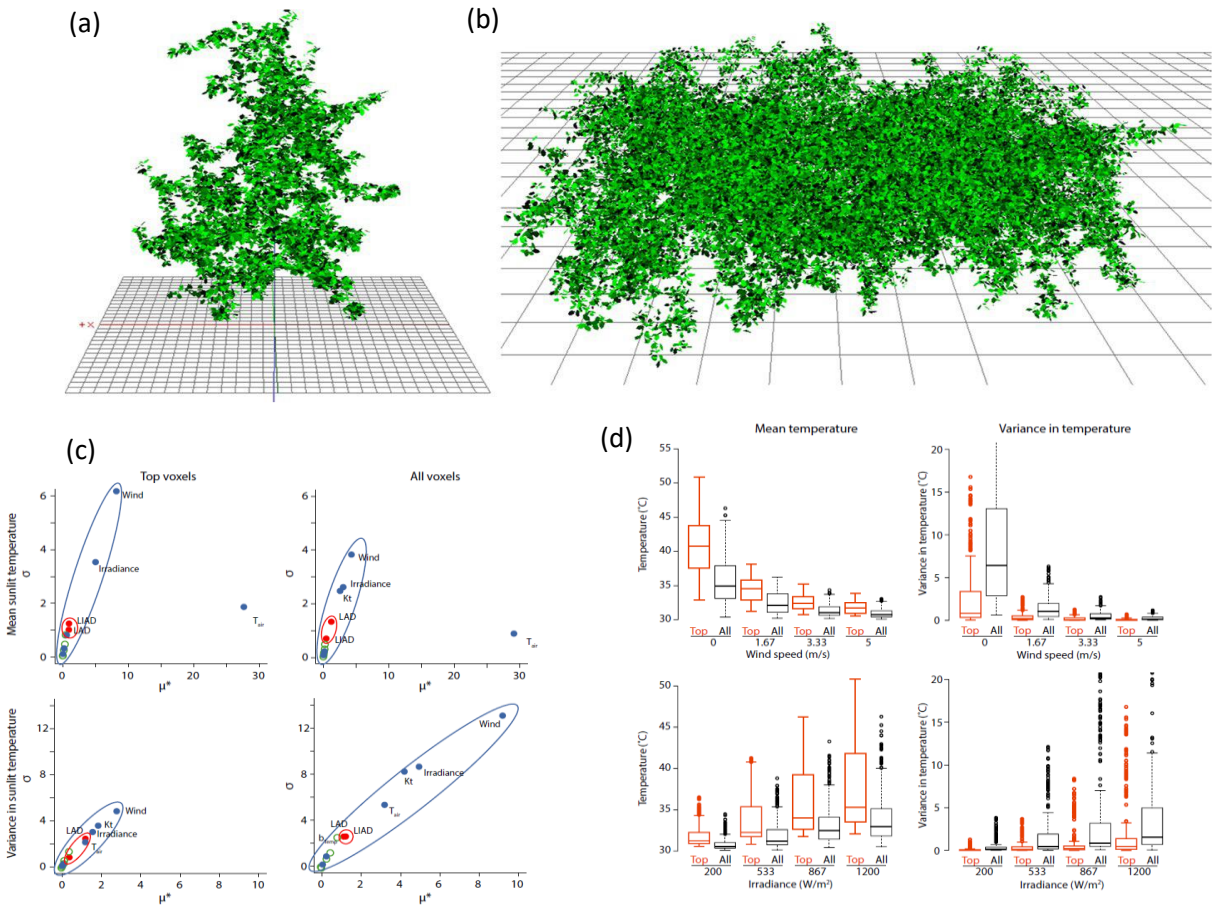


Figure 12: (a) Maquettes 3D d'un arbre isolé et (b) d'un couvert continu utilisées pour étudier le déterminisme des distributions des températures foliaires. (c) Résultats de l'analyse de Morris sur la sensibilité des températures foliaires au climat, à la structure des houppiers et à la réponse stomatique en considérant toutes les feuilles (« All voxels »), ou les voxels vus de dessus (« Top voxels »). (d) Evolution de la moyenne et de la variance des températures foliaire en fonction de la vitesse du vent et du rayonnement total incident [MS 6].

distributions de la température moyenne des feuilles pour les 2 groupes avec une sensibilité opposée au vent et au rayonnement. L'augmentation de la vitesse du vent va diminuer fortement la variabilité spatiale alors qu'un rayonnement plus intense va contribuer à l'augmenter (Figure 12d). Ce schéma peut s'expliquer par le rôle des composantes convective et radiative dans le bilan d'énergie (Eq 2). La convection va réguler les hausses de température d'autant plus fortement que le vent sera fort et diminuer le gradient thermique intra houppier, alors que le rayonnement solaire va augmenter la dichotomie entre feuilles d'ombre et feuilles de soleil et augmenter les gradients thermiques.

Il ne faut surtout pas mal interpréter ces résultats, notamment sur le rôle de la transpiration sur les températures foliaires. Ils démontrent simplement que dans des conditions normales de fonctionnement, la température est plus sensible à d'autres facteurs mais en aucun cas la régulation stomatique n'a pas son rôle à jouer. Ce lien entre régulation stomatique et température est notamment mis à profit depuis de nombreuses années en télédétection dans l'infra-rouge

thermique afin de comparer la réponse stomatique entre végétaux ou de caractériser un stress hydrique [49]. Dans le cadre d'une collaboration avec J. Ngao, nous avons essayé de mieux comprendre les liens de cause à effet entre fonctionnement stomatique et modification des distributions foliaires en considérant une situation de stress hydrique où la réponse fonctionnelle est forte [MS 14]. A partir de simulations via le modèle RATP et sur le modèle pommier, ce travail a permis de caractériser l'évolution de la distribution des températures foliaires durant la fermeture stomatique (Figure 13). Les valeurs simulées sont en accord avec les gradients thermiques mesurés par thermographie infrarouge au sein de houppier [30, 49, 86, 87], et les niveaux de variation (3 à 4°C) confirment le niveau de sensibilité de la température foliaire à la conductance stomatique issu de l'analyse de sensibilité. Plus intéressant est la dynamique des température moyenne du couvert et de sa variabilité spatiale au cours du stress hydrique avec une augmentation concomitante de la température moyenne des feuilles et de sa variance (feuilles d'ombre vs feuilles de soleil). Ce résultat suggère que la variance (inter-pixel) pourrait être également un bon indicateur du stress hydrique et donc utilisée en télédétection en plus de l'analyse des données moyennes (pixel).

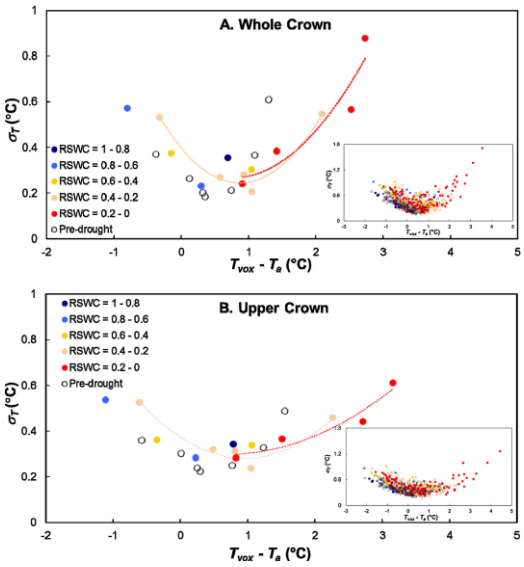


Figure 13: Evolution de la variance des températures de feuilles et de la différence entre les températures de feuilles d'un houppier et la température d'air en fonction du niveau du stress hydrique caractérisé par le RSWC (Relative Soil Water Content ou teneur relative en eau du sol). Sont considérées (A) toutes les feuilles du houppier et (B) les feuilles visibles du zénith [MS 14].

1.6. Durée d'humectation des feuilles et microclimat

Le microclimat est un déterminant du développement des ravageurs notamment fongiques. Il agit sur les étapes de sporulation et d'infection des cycles épidémiques des champignons via les facteurs thermiques et hygrométriques. A mon arrivée au sein de l'UMR PIAF, mon département d'appartenance et l'INRA en général s'étaient positionnés sur la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires. Cette préoccupation nationale s'est concrétisée par l'établissement du premier plan Ecophyto R&D (2008), dont l'objectif était de réduire de plus de 50% l'usage des produits phytosanitaires dont les pesticides d'ici 2018. Ce contexte institutionnel et les travaux de l'UMR PIAF de cette époque sur les liens entre conduite des fruitiers et microclimat lumineux [82] m'ont conduit à travailler avec l'UERI de Gotheron et notamment Luciana Parisi, pathologiste reconnue de la Tavelure du pommier due au champignon *Venturia inaequalis* [52] ,

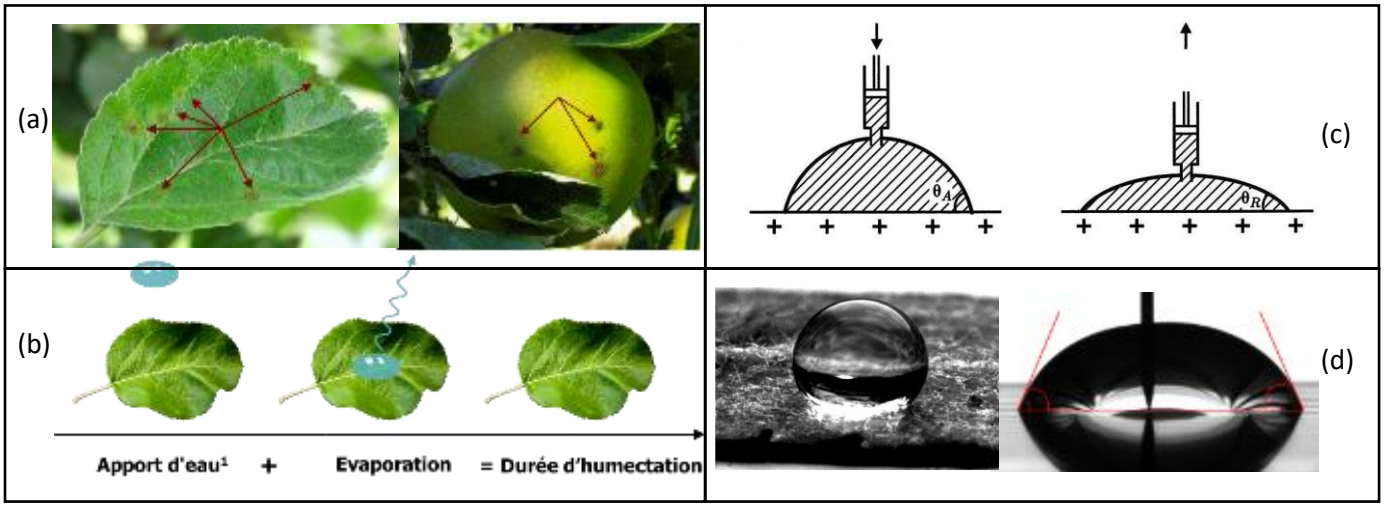


Figure 14 – (a) Symptôme de la tavelure du pommier sur feuille et fruit. (b) Définition de la durée d'humectation. (c) Protocole de mesure et définition des angles dynamiques. (d) Exemple de forme de gouttes d'eau sur feuille et Parafilm (Thèse Alexandre Leca, [MS 104]).

sur le patho-système Pommier/Tavelure. En effet la production fruitière est un agrosystème très consommateur en produits phytosanitaires afin d'assurer une production répondant à des critères de qualité exigeant dont l'absence de maladie et de défauts des fruits. Parmi les nombreuses maladies impactant la pomiculture, la tavelure est la maladie du pommier la plus répandue et par conséquent la plus traitée au monde (Figure 14a). Les programmes d'amélioration variétale, avec la sélection de variétés présentant un gène de résistance, le gène Vf, a permis de progresser dans la lutte et de proposer des variétés plus résistantes (comme la variété Ariane développée par l'INRA), nécessitant *de facto* moins de traitement. Toutefois ces variétés résistantes ne constituent pas à elles seules une méthode de lutte durable car la résistance apportée par ce gène a été rapidement contournée par des souches virulentes de *Venturia inaequalis* [88] . Parmi les méthodes alternatives, la gestion du microclimat via la modification de l'architecture des arbres (conduite) est apparue comme un levier potentiel de régulation de la Tavelure. J'ai ainsi co-encadré la thèse de Mr Alexandre Leca (2008-2011) intitulée « Contribution à l'étude de la durée d'humectation au sein d'un couvert de pommier ».

La température y joue un rôle indirect via son action sur le taux d'évaporation de l'eau liquide à la surface des organes déterminant en partie la durée d'humectation (le temps de présence de l'eau liquide à leur surface) qui résulte d'un apport d'eau par la pluie ou la rosée et son évaporation (Figure 14b). L'objectif de la thèse était de mieux comprendre le déterminisme de la durée d'humectation au sein d'un couvert arboré. Les hypothèses que nous voulions testées étaient que (i) la structure du couvert avait un rôle prépondérant dans la répartition spatiale de la durée d'humectation via le rôle du microclimat radiatif sur la phase d'évaporation de l'eau, et (ii) la mouillabilité du support pouvait expliquer la sensibilité ontogénique et intervariétale des feuilles de pommiers. Pour aborder ce sujet, une approche couplant expérimentation et

modélisation de l'organe à la plante a été développée en apportant un œil critique sur sa modélisation dans le cadre de la protection des cultures [MS 26]. Cette problématique est très intéressante dans un contexte finalisé toujours d'actualité (voir plan EcoPhyto 2021 : https://agriculture.gouv.fr/ecophyto) et sur le plan scientifique à la croisée de plusieurs disciplines :bioclimatologie [89], mouillabilité des surfaces [90] et épidémiologie des maladies fongiques [91].

Trois échelles ont été abordées au cours de ce travail: i) l'échelle microscopique dans l'étude des interactions entre une goutte d'eau et son support; ii) l'échelle de l'organe dans la modélisation de l'évaporation d'une goutte sur une feuille en fonction de son micro-environnement, et iii) l'échelle de l'arbre dans l'étude de l'influence de la structure de l'arbre sur la durée d'humectation. Ces changements d'échelle se sont imposés pour réunir toutes les informations nécessaires à l'avancement d'une modélisation fiable de l'évaporation d'une goutte sur une feuille dans des conditions au champ. En effet ces trois échelles illustrent parfaitement l'influence des différents paramètres clés dans l'évaporation d'une goutte dans un verger. Par la structuration spatiale de son feuillage, l'arbre va générer une variabilité de microclimat à l'échelle des feuilles, microclimat qui va conditionner le temps d'évaporation des gouttes dont les formes et donc les surfaces d'échange vont dépendre des interactions avec leurs supports. Ces trois niveaux d'approche centrés sur l'évaporation d'une goutte ont fourni des résultats qui apportent des réponses aux questions initiales, mais dont il est nécessaire de préciser la portée. A l'échelle de l'organe, A Leca a tout d'abord caractérisé les propriétés de mouillabilité de différentes feuilles de pommiers (Figures 15). La mouillabilité est un terme générique qui renseigne sur la capacité de l'eau à s'étaler ou non sur une surface et donc à former des gouttes ou des films liquides. Ainsi sur un support non mouillant, l'eau aura tendance à former des gouttes alors que sur un support mouillant l'eau va former un film liquide. Pour un volume identique, ces

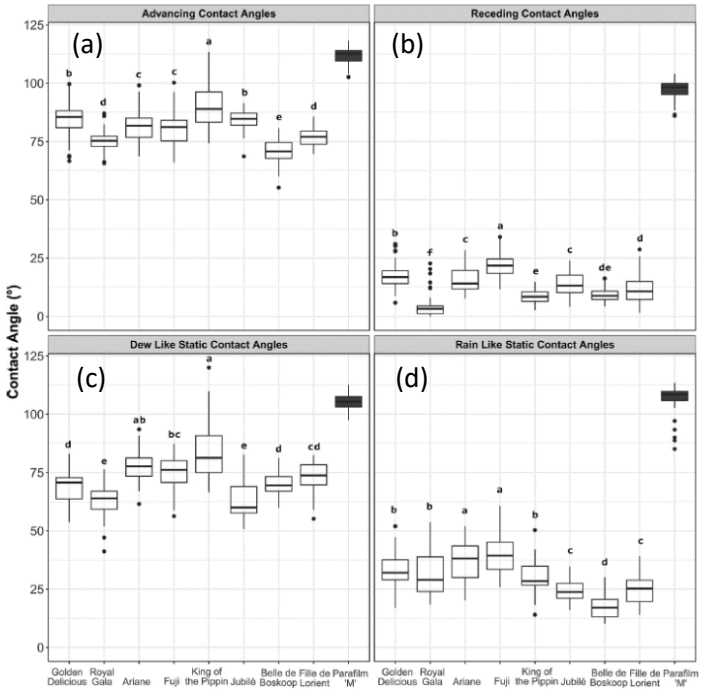
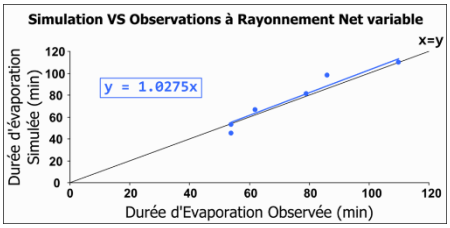
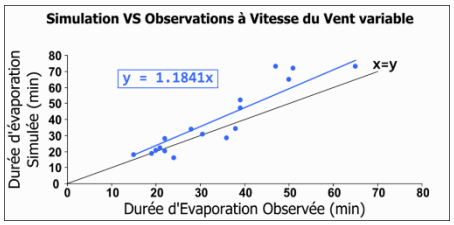


Figure 15 – Variabilité inter variétale de la mouillabilité mesurée sur feuilles de pommiers et comparaison avec un support inerte (Parafilm) : (a) angle d'avancé, (b) angle de recul et angles statiques obtenus (c) par dépôt d'une goutte et (d) par lâché d'une goutte [MS 3].

2 états vont conduire à des surfaces d'échange différentes et donc à des temps de séchage différents. La mouillabilité d'un support peut se caractériser par la mesure de 3 angles : un angle statique qui est l'angle entre une goutte et son support à l'équilibre, et deux angles dynamiques dits de recul et d'avancé lorsque la goutte n'est pas en équilibre (Figure 14c - [92]). Une surface hétérogène est une surface non idéale qui présente une grande variabilité de valeurs d'angles de contact à sa surface. On décrit l'hétérogénéité de surface en définissant l'hystérésis (hystérèse) de l'angle de contact. Notée $\Delta\theta$, elle est en fait définie comme l'intervalle de valeurs d'angles compris entre l'angle de recul et l'angle d'avancée : $\Delta\theta = \theta a - \theta r$ ([90]; et dépend des hétérogénéités géométrique et chimique de la surface, i.e impuretés et/ou structure moléculaire. Dans la pratique, tous les angles de contact statiques que peuvent prendre des gouttes d'un même liquide sur un support donné seront toujours compris dans cet intervalle. La mesure de ces angles peut se faire à l'aide de l'analyse d'images pour le cas statique et de vidéo pour les angles dynamiques. Ainsi A. Leca a mis en place une expérimentation dédiée par prise de vue de profil de goutte et par la méthode gonflage ou aspiration des gouttes pour la mesure des angles dynamiques (figure 14d). Sachant que l'hétérogénéité de la surface de nos matériaux peut être grande, notamment sur feuilles, deux modes de dépôt de goutte pour mesurer les angles de contact statiques ont été utilisés : (i) un dépôt de la goutte "à même" le support : la goutte est déposée délicatement et (ii) un "lâché" de goutte : à une hauteur d'environ 10cm au-dessus du support. Ces deux méthodes peuvent être vues comme une approximation de la nucléation de la rosée dans le cas (i), et comme une approximation du comportement d'une goutte de pluie dans le cas (ii). Ces mesures angulaires ont été effectuées sur des feuilles de 8 variétés de pommiers et comparées à des mesures sur support inerte, le Parafilm 'M' (Pechiney Plastic Packaging Company, Chicago, Illinois, USA). Les résultats ont en évidence une variabilité ontogénique de la mouillabilité au sein d'un cultivar de pommier, Golden Delicious, montrant ainsi que l'évolution physiologique de la feuille a un effet non négligeable sur l'état de sa surface. Cela pourrait expliquer en partie la résistance ontogénique des feuilles à la maladie de la tavelure. Nos travaux à ce niveau d'échelle ont également permis de vérifier les hypothèses d'existence d'une variabilité de la mouillabilité des feuilles au sein de l'espèce de pommier *Malus domestica*, et d'une variabilité de la mouillabilité de différentes espèces de fruitiers de la famille des rosacées (Figure 15 – [MS 3]). Cette thèse a été l'occasion pour moi de m'intéresser plus avant sur les phénomènes capillaires d'un point de vue physique et d'un point de vue formalisation [90]: mouillabilité, tension superficielle, loi de Laplace, loi de Jurin, et leurs rôles dans le fonctionnement des plantes en général. Une petite



Paramètre variable	Pente de la droite de régression	R^2
Volume	1.012	0.965
Température	1.030	0.976
Humitié Relative	1.020	0.900
Vitesse du Vent	1.184	0.867
Rayonnement Net	1.027	0.936



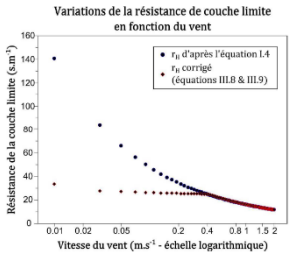


Figure 16 – Comparaison de la durée d'évaporation d'une goutte d'eau simulée avec des observations en condition contrôlée en fonction. (a) Courbes de régression pour différents niveaux de (a) rayonnement et (b) de vitesse de vent. (c) Tableau récapitulatif des courbes de régression obtenues pour différents volumes de goutte, niveau de rayonnement, vitesse de vent, hygrométrie et température de l'air ambiant [MS 26]. (d) Dérivation d'une résistance de couche limite au transfert d'eau (Eq. 6) pour des faibles vitesses de vent (Thèse Alexandre Leca).

synthèse sur ces aspects a été rédigée avec Alexandre Leca et publiée dans le cadre de la mise en place d'un site web par P. Cruiziat, B. Itier et A. Granier, sur les connaissances classiquement abordées sur les plantes et l'eau en collaboration avec Pierre Cruiziat [MS 101].

Ces expérimentations à une échelle très fine ont été effectuées pour atteindre un objectif majeur dans ce travail de thèse : développer un modèle d'évaporation représentatif des interactions entre l'eau et son support. Basé sur le bilan d'énergie (Eq. 1 et 2) il modélise le flux d'eau évaporé à travers la surface d'une goutte. Il prend en compte l'évolution de la forme de la goutte dépendant de la mouillabilité du support et les différents flux du bilan d'énergie. Il a ainsi été possible d'évaluer la sensibilité des équations décrivant le processus d'évaporation aux paramètres climatiques et morphologiques. Ce modèle a tout d'abord été confronté à des données obtenues en conditions contrôlées et sur Parafilm (communication personnelle de Magarey et publiées dans Magarey et al, 2005 [93]) et au champ (mesurées dans le cadre de la thèse d'Alexandre Leca). Lors de la comparaison avec les données, il est apparu que l'effet du vent était mal pris en compte, notamment dans le cas des faibles vitesses de vent (< 0.25 m.s^{-1}). Une analyse poussée de l'expression de la conductance de couche limite (terme g_b dans Eq. 4) a permis de corriger ce biais via la prise en compte des régimes de diffusion et de convection mixte en plus du régime de convection forcée initialement inclus dans le modèle. Après ajustement du modèle avec les conditions de vent très faible, les résultats se sont avérés particulièrement concluants, le modèle restituant convenablement les durées d'évaporation observées expérimentalement (Figure 16). Une analyse de sensibilité du modèle a permis de montrer que l'hygrométrie de l'air et le rayonnement sont les principaux moteurs de l'évaporation et que l'angle de contact a une influence

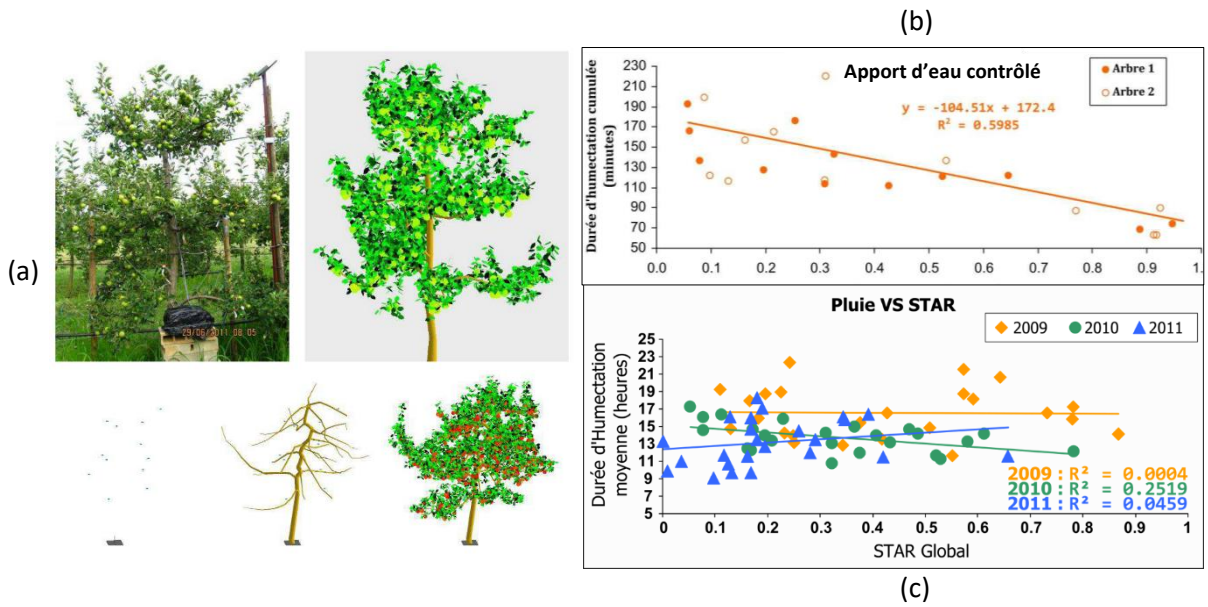


Figure 17 – Humectation du feuillage – (a) Mesure et reconstruction de maquettes 3D de pommiers et positionnement des capteurs de durée d'humectation au sein des houppiers. (b) Corrélation entre le temps d'évaporation de gouttes et leur niveau d'éclairement (STAR) dans le cas d'un apport d'eau contrôlé et uniforme au sein d'un houppier. (c) Corrélations entre durées d'humectation mesurées et niveau d'éclairement (STAR) dans le cas d'épisodes pluvieux pour les années 2009, 2010 et 2011 (Thèse Alexandre Leca).

forte sur la durée d'évaporation, en plus de la température et de la vitesse du vent. Toutefois, ce modèle s'est révélé incapable de reproduire des durées d'évaporation observées en conditions naturelles sur la surface hydrophile d'un capteur de durée d'humectation. Par manque de temps, nous n'avons pu aborder en profondeur ce problème, mais son origine a été ciblée sur le paramètre décrivant la couche limite de la goutte.

Les expérimentations au champ, menées en parallèle des études de mouillabilité et des travaux de modélisation, ont été effectuées dans le but de mettre en évidence un paramètre caractérisant la variabilité spatiale de la durée d'humectation dans un arbre. Pour cela des capteurs de durée d'humectation ont été positionnés dans la frondaison de 2 pommiers (Figure 17a). Nous avons ainsi cherché à caractériser cette variabilité à l'aide d'un paramètre rendant compte de l'hétérogénéité structurale de l'arbre. Le niveau d'éclairement des capteurs, estimé par leurs valeurs de STAR qui décrit l'éclairement d'un objet au sein du couvert, nous semblait plus pertinent au vue de l'importance du rayonnement dans le processus d'évaporation d'une goutte. L'acquisition simultanée des positions des feuilles et des capteurs au sein des houppiers permet de reconstruire des maquettes virtuelles et d'estimer L'acquisition simultanée des positions des feuilles et des capteurs au sein des houppiers permet de reconstruire des maquettes virtuelles et d'estimer l'exposition des capteurs via le calcul des valeurs de STAR par exemple (Figures 17b, 17c, 17d). Les résultats obtenus peuvent se résumer ainsi: i) aucune corrélation entre STAR et durée d'humectation liée à la pluie n'a été observée; ii) une corrélation entre STAR moyen et durée d'humectation liée à la rosée a été mise en évidence, mais elle n'existe pas pour les zones

trop ombragées (STAR inférieurs à 50%); iii) une corrélation entre STAR et durée d'évaporation a été mise en évidence, mais uniquement pour des fortes valeurs de STAR (supérieurs à 50%). L'éclairement étant un proxy assez fiable du rayonnement, ces résultats étaient surprenants car ils allaient un peu à l'encontre du rôle prépondérant du rayonnement mis en évidence à l'échelle d'une goutte. Ainsi et pour mieux cerner les liens entre éclairement et durée d'humectation, des apports d'eau contrôlés, i.e. volume et distribution de gouttes identiques, ont été faits sur les capteurs installés dans les frondaisons. Comme attendues, les durées d'évaporation sont fortement corrélées à l'éclairement avec une durée d'autant plus faible que l'éclairement (et donc le rayonnement) est élevé (Figure 17b). La durée d'humectation étant la conséquence d'un apport d'eau et de son évaporation, ces résultats suggèrent que la composante dépôt d'eau (pluie ou rosée) est proportionnelle à l'exposition et vient contrebalancer le lien entre évaporation et éclairement (Figure 18). Une analyse bibliographique et physique des processus d'apport d'eau par la pluie et par dépôt de rosée [94-96] montre effectivement que les relations entre apport d'eau/STAR et évaporation/STAR sont antagonistes annulant de facto la corrélation durée d'humectation et STAR. Une expérimentation dédiée afin de vérifier cette hypothèse *in natura* n'a pas pu être menée dans le cadre de cette thèse mais mériterait d'être investiguée. Remis dans le contexte de la conduite des fruitiers, ces résultats suggèrent qu'il n'est pas ou peu envisageable de contrôler ou optimiser la durée d'humectation via le mode de conduite.

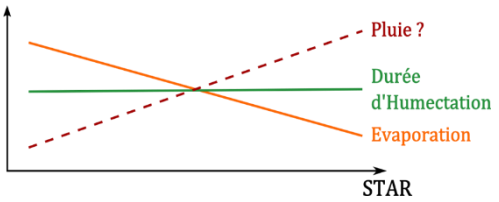


Figure 18 – Schéma résumant les corrélations avec le niveau d'éclairement d'une goutte (STAR) et du temps d'évaporation, du volume d'eau apporté par la pluie et de la durée d'humectation (Thèse Alexandre Leca).

1.7. Sur les approches de modélisation et méthodologiques mobilisables sur des enjeux finalisés

Il me semblait important de faire un point particulier sur mes activités de recherche en lien avec les services écosystémiques rendus par les arbres sur les aspects thermiques, notamment dans le cadre des changements climatiques. Ce travail plus finalisé est dans la continuité de mes travaux sur la température des organes végétaux et sur le microclimat en général. Mon implication se décline en 2 volets bien distincts. Dès mon arrivée au sein de l'UMR PIAF, j'ai contribué aux questions autour de la régulation des ravageurs via le levier microclimatique sur les maladies fongiques (ANR Gedupic, projet ARC INRA-INRIA, thèse A. Leca) et les insectes (thèse A. Scomparin, Post-doc D. Biron, ANR MicroClimite). Plus récemment, je me suis ensuite engagé sur les servies écosystémiques rendus par les arbres sur des problématiques de régulation des stress thermiques via les processus d'ombrage et transpiration sur 2 contextes différents : la ville

et l'agroforesterie. Mon cursus de recherche, mes compétences et les outils utilisés (RATP par ex.) me rendait légitime pour aborder des problématiques à l'interface entre la bioclimatologie urbaine ou agroforestière et la physiologie des arbres. Soit de manière directe via la coordination du projet ANR Cooltrees ou des actions dans le projet structurant I SITE/Cap 20-25 de Clermont-Ferrand, soit indirectement via le co-encadrement de la thèse d'Elena Bournez et le travail au sein de l'équipe MEA lors de collaborations régulières avec Thierry Améglio sur le fonctionnement et la santé des arbres urbains (projet européen UrbanMycoServe [MS5, MS7, MS8, MS9], projet science citoyenne Earthwatch [MS2, MS69, MS78, MS79]).

Microclimat et développement des ravageurs

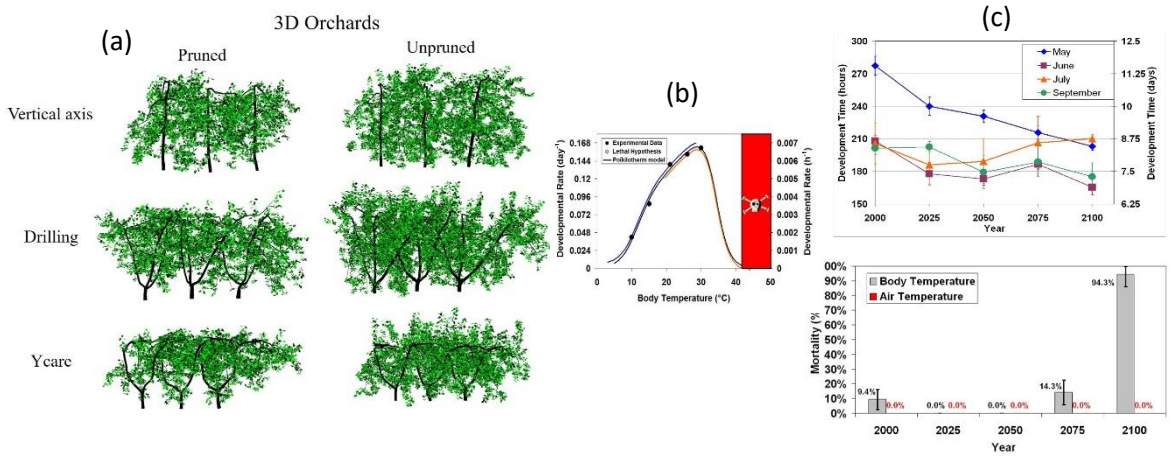


Figure 19 – Etude de l'importance du microclimat et de la température réelle des feuilles sur le développement des ravageurs dans un contexte de changemet climatique : cas du pathosystème Phyllonorycter blancardella (F.) / pommier (*Malus* Domestica) d'après Saudreau et al. (2013) [MS 24] : (a) Architectures étudiées variant suivant le nombre de charpentières et l'application d'une taille, (b) relation entre le taux de développement et la température corporelle de la larve, et (c) effets du changement climatique et de la conduite des pommiers sur le temps de développement moyen au sein du houppier et la mortalité des larves.

Ce travail avait été initié et porté par Hervé Sinoquet dans le cadre de la thèse de Sylvain Pincebourde et du post-doc de David Biron qu'il avait co-encadrés. Mon investissement sur ce sujet a consisté à utiliser le modèle RATP afin de tester l'hypothèse selon laquelle le mode de conduite des arbres fruitiers serait un levier permettant de diminuer le développement d'insectes herbivores ou de maximiser leur mortalité [79, 97]. Il visait également à quantifier dans quelle mesure la manipulation de l'architecture des arbres peut amortir les variations des conditions climatiques et ensuite réduire les impacts du changement climatique sur un insecte phytophage [35]. Ce travail illustre parfaitement l'apport de la modélisation dans (i) l'analyse des systèmes complexes où différentes échelles spatiales et temporelles coexistent et où les processus sont en fortes interactions, et (ii) la nécessité de prendre en compte la température du micro-habitat à la place de la température de l'air dans les modèles de prédictions. Pour tester ces hypothèses, la dynamique horaire de la température corporelle d'une mineuse foliaire au stade larvaire

(*Phyllonorycter blancardella* (F.) (*Lepidoptera*: *Gracillariidae*)) a été simulée à partir des conditions météorologiques horaires basées sur scénario moyen de changement climatique du GIEC pour 6 typologies d'arbre (3 architectures et arbres taillés et non taillés – Figure 19a). Les résultats publiés dans Saudreau et al. (2013) [MS 24] ont porté sur les variabilités intra annuelle et inter annuelle du taux de développement des larves et de leur mortalité. Ils ont montré que la taille des arbres influence de manière significative le temps de développement des larves et leur mortalité, contrairement à la structure des arbres. Toutefois l'impact des actions de conduite des arbres (formation ou taille) sur le développement et la survie des larves est relativement faible par rapport à l'impact des variations climatiques au cours du siècle. Cette étude a également montré que la variabilité intra annuelle du temps de développement de la chenille tendra à diminuer au cours du 21ème siècle (Figure 19c). A contrario il faudra s'attendre à une augmentation très marquée de la mortalité des larves (Figure 19c). Ces résultats doivent être bien sûr analysés et interprétés avec précaution. Ils ont en effet été obtenus pour des conditions bien définies en terme de forçage climatique et de réponse thermique de la larve, et ignorent les effets potentiels d'autres facteurs abiotiques ou le processus de sélection de larves plus résistantes au cours du siècle. Ainsi la généralisation à d'autres pathosystèmes et d'autres conditions climatiques n'est pas immédiat et nécessite une réflexion plus globale qui dépasse du cadre de modélisation présenté ici [MS 105]. Toutefois ce travail souligne l'importance (i) d'utiliser des courbes de taux de croissance non linéaires pour estimer les réponses des ravageurs à la température (Figure 19b) et (ii) d'estimer la température du corps de l'insecte ou du microhabitat plutôt que la température de l'air dans les modèles de prévision des épidémies de ravageurs (Figure 19c).

Mitigation des stress thermiques par les arbres

Les arbres urbains et ilots de chaleur

L'adaptation des villes aux changements climatiques attendus passe par une amélioration du confort thermique dans le milieu urbain, notamment lors des phénomènes de fortes chaleurs comme les ilots de chaleur urbain (ICU). Parmi l'éventail de solutions, l'augmentation des surfaces végétales, en introduisant davantage de pelouses et d'arbres, semble une solution prometteuse, car au-delà de l'aspect thermique, elle offre aussi une large palette de services : sociétaux (bien-être), environnementaux (captation du CO_2) et donc indirectement économiques. Toutefois, la mise en œuvre du levier végétal nécessite de bien comprendre le fonctionnement de la végétation et de ses interactions avec le microclimat urbain. Sur ce point, le bénéfice d'une strate arborée en milieu urbain repose sur la capacité des arbres à intercepter le rayonnement

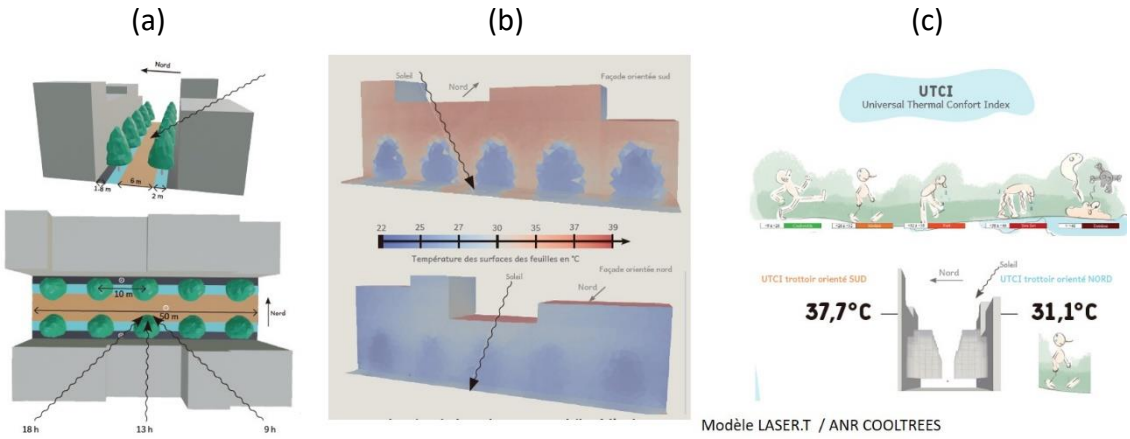


Figure 20 – Illustration d'une rue canyon simulée par le modèle LASER.T qui modélise les flux d'énergie échangés entre les couverts arborés et les éléments minéraux d'un paysage urbain. (a) Vues de la rue canyon. (b) Températures de surface des murs exposés au soleil et à l'ombre simulées par LASER.T. (c) Indice de confort thermique (UTCI) ressenti par l'usager simulé par LASER.T en fonction de sa position dans la rue [MS 103]

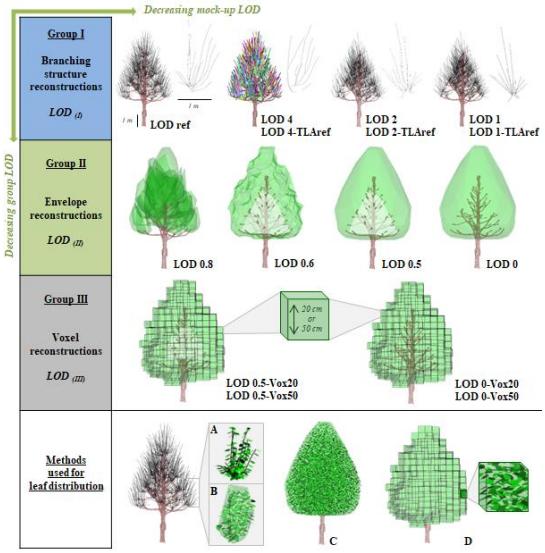
solaire et à refroidir la masse d'air par transpiration. C'est sur la formalisation et la quantification de ces deux processus que j'interviens.

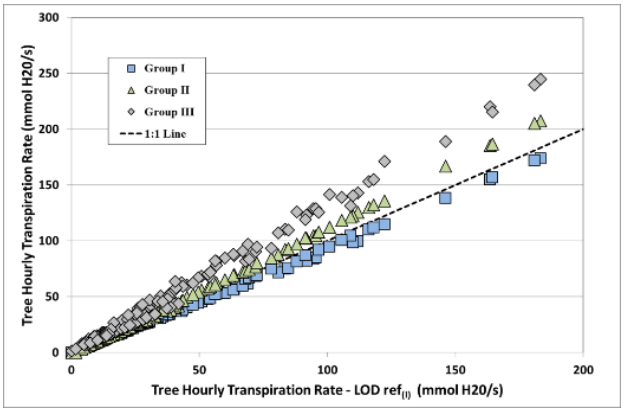
Mon intérêt pour ce sujet est tout d'abord scientifique car nos travaux (mes collègues de l'UMR PIAF et moi) peuvent répondre aux questionnements sur ce sujet, et l'environnement urbain est intéressant car différent et plus complexe que l'environnement forestier ou horticole où j'ai l'habitude d'intervenir. Mon intérêt est également personnel. Il me paraît en effet important en tant que citoyen d'apporter mon soutien ou de promouvoir des actions qui permettent d'améliorer la vie en milieu urbain et de valoriser le statut des arbres urbains, d'où mon investissement dans des projets auprès des collectivités locales, de science citoyenne pilotée par Thierry Améglio et dans des communications non académiques auprès du grand public [MS68, MS70, MS71, MS72, MS74, MS75, MS80, MS84, MS102]. Ces articles de vulgarisation permettent également de clarifier auprès du grand public le pouvoir « rafraîchissant » des arbres, car ce pouvoir est en effet limité et la présence des arbres pourra au mieux ramener les villes à des températures acceptables et proches des conditions thermiques extra urbaines.

Sur le terrain scientifique, les processus d'interception du rayonnement et de transpiration par un couvert arboré sont connus et bien formalisés mais doivent être appréhendés dans un environnement urbain notamment sur les flux radiatifs échangés entre une strate arborée et des surfaces planes (sol, mur). C'était un des objectifs du projet ANR COOLTREES (2017-2021) que j'ai coordonné. Au-delà des aspects scientifiques, une des originalités du projet a résidé également dans l'interdisciplinarité et l'implications de partenaires divers (INRAE, CNRS, Universités Clermont-Auvergne et Strasbourg, Association Plantes & Cités, Eurométropole de Strasbourg) autour d'un objet commun: les arbres urbains, et d'un outil commun: la modélisation. Ce projet

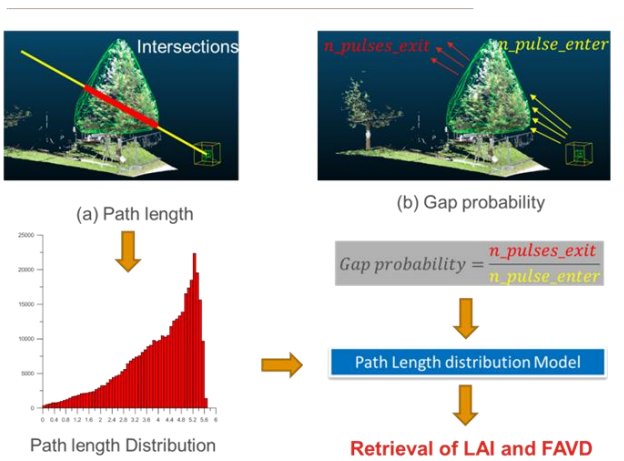
a permis de mieux quantifier l'impact des arbres sur l'ambiance thermique urbaine locale, et une base de données regroupant toutes les mesures effectuées entre 2014 et 2018 sur la zone d'étude a été créée [MII Alice Maison] et regroupe la géométrie des bâtiments et des arbres (acquisitions LIDAR), les données météorologiques, les flux de chaleur latente des arbres (flux de sève), et des suivis de températures de sol et de couvert. L'ensemble de ces données est assez unique dans la communauté scientifique travaillant sur le rôle des arbres sur le microclimat urbain. C'est pourquoi un « data paper » qui rendra ces données accessibles à la communauté scientifique est en cours de finalisation [MS 103]. Cette base de donnée pourra être utilisée pour valider des modèles de climat ou de microclimat urbain. Une première action d'utilisation et de valorisation a été faite par Le Mentec et al (2022) [MS 1] sur le couplage entre le modèle TEB [98] et Surfatm [99]. En parallèle un outil de modélisation des interactions entre fonctionnement des couverts et microclimat urbain : le modèle LASER.T, a été mis développé (Figure 20 – [MS 99, MS 103]). Ce modèle est né de la fusion entre un modèle simulant les échanges thermo-radiatif en milieu urbain LASER/F (https://sites.google.com/view/laserf [40]) et le modèle spatialisant le fonctionnement des couverts et le microclimat RATP (https://www6.clermont.inrae.fr/piaf/Methodes-et-Modeles/RATP, [60]) . Il a été conçu via l'encadrement de 2 CDDs en collaboration avec P. Kastendeuch de l'université de géographie de Strasbourg (T. Chakkour et M Woussen). Des modèles de ce type existent déjà (notamment Solène Microclimat [100]) mais il s'agissait ici de faire un saut qualitatif dans la représentation du fonctionnement des arbres. Il présente plusieurs atouts vis-à-vis des modèles existants. Il simule de manière couplée les interactions thermo-radiatives entre les différents éléments d'un paysage urbain, végétation incluse, et est capable de spatialiser le microclimat au sein des houppiers.

(a)





(b)



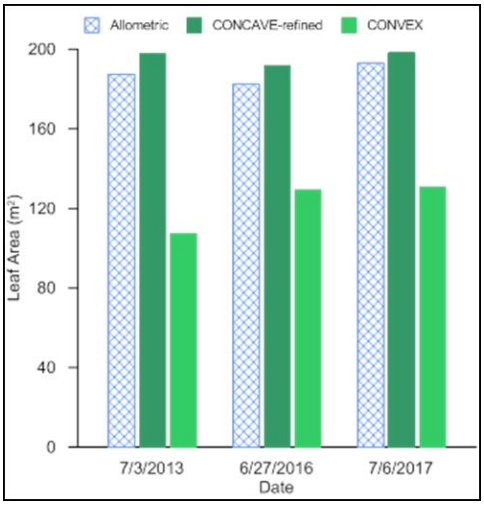


Figure 21 – (a) Différents niveaux de reconstructions 3D d'un arbre urbain, un tilleul argenté, (LOD = Level Of Details) à partir d'acquisition par Lidar Terrestre, et conséquences sur la prédiction du taux de transpiration estimé par le modèle RATP [MS 4]. (b) Méthodologie d'estimation de la surface foliaire totale, de la densité foliaire et du LAI d'un arbre à partir d'acquisitions LIDAR, et comparaison avec une estimation de la surface foliaire totale (m²) calculée à partir d'une maquette3D de référence [MS 11].

Un des constats issus de ce projet et des nombreuses discussions tenues avec des acteurs de terrain autour des arbres urbains, est le manque des données sur des traits fonctionnels et structurels des arbres urbains. Ils sont pourtant nécessaires à la quantification des processus de transpiration et d'ombrage qui vont dimensionner le niveau de mitigation des ICU par les couverts arborés, et donc à la définition de nouveaux aménagements. Ce besoin fait écho au besoin de méthodologies de mesure « haut débit » et in situ de ces traits. Le développement de méthode d'analyse des données issues de Lidar terrestre ou aéroporté est alors souhaitable pour avancer sur le volet structure, d'où mon implication sur ce sujet pendant le co encadrement de la thèse d'Elena Bournez [MS 4]. Durant sa thèse de nombreux arbres ont été scannés et reconstruits manuellement avec identification des pousses et l'utilisation de relations allométriques pour reconstruire le feuillage [101]. Ces reconstructions 3D peuvent ainsi servir de références pour tester des outils et méthodologies de reconstructions automatiques ou d'obtention des traits

foliaires [MS 40, MS 43, MS 46]. C'est ce que nous avons proposé dans le cadre de la thèse d'Elena Bournez. Ces reconstructions ont permis d'aborder la question de l'échelle minimale de représentation des arbres pour une simulation pertinente de l'effet rafraîchissant [MS 4, MS 43] (Figure 21a) et de valider une méthodologie d'estimation des traits foliaires à partir d'acquisition LIDAR [MS 11] (Figure 21b). Il faut évidemment également avancer sur le développement de capteurs qui permettent de suivre le fonctionnement et la croissance d'un arbre afin d'en déduire des informations fonctionnelles. Sur ce volet, mon investissement se limite à une collaboration riche avec Thierry Améglio (UMR PIAF) qui est à l'origine de la mise en place de capteurs de variation de diamètre (dendromètre - PepiPIAF) sans fil et très performants [102].

Agroforesterie et bien-être des cultures et des animaux

Sur la durabilité des systèmes arborés face aux changements climatiques, je me suis engagé sur la période 2018-2021 sur deux actions du challenge 1 du projet CAP 20-25 qui a pour objectif d'adapter les céréales et les herbivores au changement climatique dans le but d'obtenir des agroécosystèmes durables dans un contexte de changement global. Le projet ISITE de Clermont-ferrand dont le Livrable 6 : « idéotypes d'arbres et d'herbacées cultivées pour des systèmes agro-forestier agricoles ou sylvopastoraux », vise spécifiquement l'étude des systèmes de cultures hétérogènes en terme de structuration spatiale et multispécifique comme l'agroforesterie. Ces projets vont être poursuivis et me permettent de me positionner sur ces questions et de continuer à aborder des questions de dynamique thermique sur des échelles spatiales et temporelles variées [MS 77].

Le premier projet, TreeCoolWheat, porte sur la mitigation de l'échaudage des céréales par les arbres. Il vise à évaluer l'intérêt de la mise en place de couverts agroforestiers blé/arbre dans une stratégie d'évitement de stress thermiques pour le couvert de blé. L'étude se focalise sur l'évitement du stress thermique autour de la floraison du blé, stress générant une chute de fertilité de l'épi et de ce fait du nombre de grains par m², c'est le phénomène d'échaudage, composante importante dans le déterminisme du rendement [103]. Dans le cadre de ce projet, relier le climat

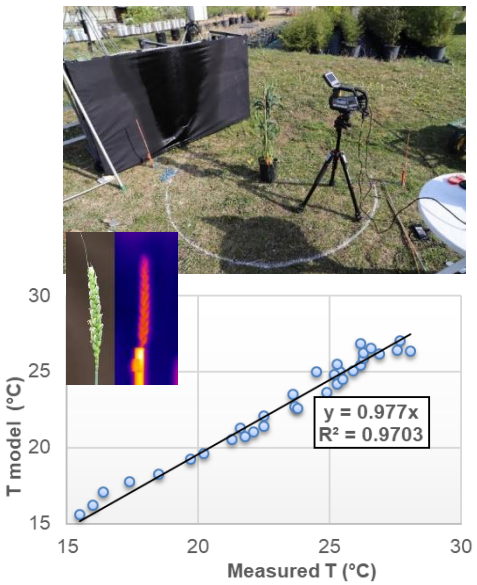


Figure 22 : Confort thermique - Température d'épi de blé. Expérience réalisée en conditions réelles et fluctuantes, et régression entre simulation et mesure.

local d'une parcelle (température, rayonnement, vent) à la température locale et réellement perçue par les épis est un verrou important. Ce projet s'est décliné en trois grandes étapes. Dans un premier temps, il est nécessaire i) de caractériser les pertes de fertilité des épis liées à des expositions variables à des températures élevées et parallèlement, ii) de caractériser et modéliser thermiquement les épis en fonction de conditions environnementales locales autour de l'épi et iii) de simuler les effets du changement climatique (et des augmentations de température) sur la perte de fertilité des épis de blé en monoculture. Ce projet est en droite ligne de mes travaux précédents sur la caractérisation et la modélisation des températures d'organes mais appliqué à un épi de blé. Dans la littérature, de nombreux modèles permettant d'estimer la température d'une culture et notamment du blé [104] ont été développés mais ils ne s'intéressent qu'à la température du couvert i.e. des feuilles, et pas à la température des autres organes comme les épis. J'ai ainsi co-encadré avec Vincent Allard et Christine Girousse de l'UMR GDEC pendant 2 années une CDD ingénieure, Aurélie Grosperrin, sur ce sujet afin de développer un modèle thermique simple d'un l'épi de blé constitué d'épillets. Différents degrés de finesse dans la modélisation peuvent être entrepris : de l'organe 3D où la variabilité spatiale de la température est bien décrite à un objet moyen (2D ou 1D) où seuls les moyenne et extrema de température sont recherchés. La mise en place d'une modélisation 3D d'un épi présente de nombreux inconvénients et obstacles. La géométrie d'un épi est complexe. Les transferts d'énergie, notamment liés au vent et à la turbulence, sont inconnus. Cette approche nécessite un maillage très dense avec comme conséquence des temps de calculs prohibitifs. Le choix s'est donc porté vers un modèle thermique simple et quasi 2D où l'évolution temporelle du gradient de température à la surface d'un épi et de sa température moyenne pour des conditions météorologiques données sont simulées. Toutefois, et afin d'estimer le rôle de la géométrie dans

le déterminisme de la température des grains, et la perte d'information lors de l'utilisation d'un modèle simple, un modèle dit 3D a été réalisé à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics (https://www.comsol.fr/). Ce modèle a montré une bonne adéquation avec des mesures en condition constante et contrôlée (RMSE, R^2). Il a également montré sa pertinence en conditions réelles et fluctuantes (RMSE, R^2) (Figure 22) et a permis de mettre en évidence le couplage fort des conditions thermiques avec les fluctuations de l'environnement, notamment les fluctuations du vent. Une publication est en cours de rédaction sur ce modèle.

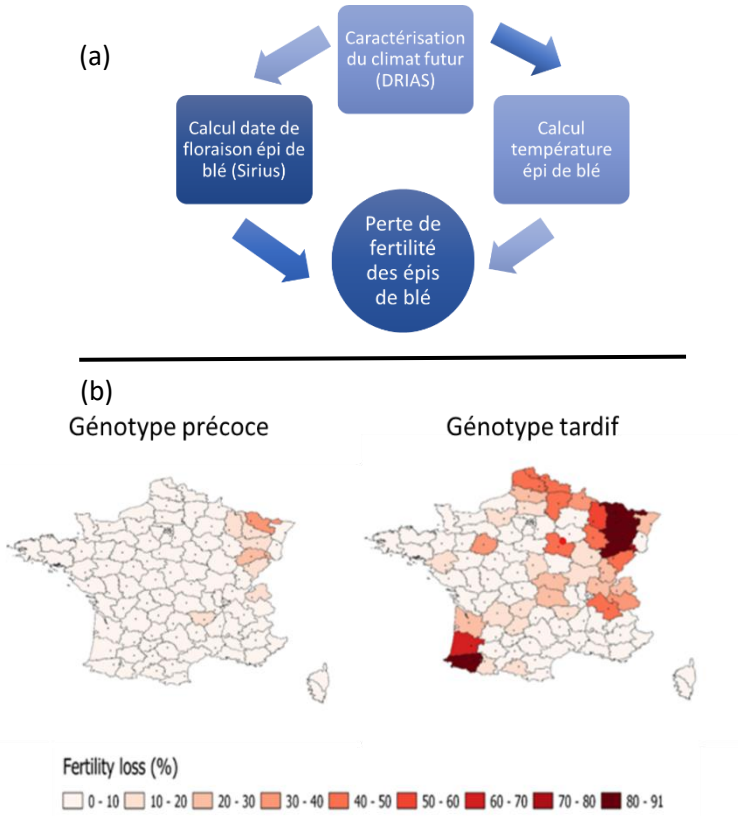


Figure 23 : Confort thermique - (a) Schéma de modélisation mis en place pour simuler les effets de la température sur la phénologie du blé et l'occurrence de stress thermique. (b) Exemple de cartographies du risque d'échaudage du blé prédit en 2100 sur le territoire métropolitain pour un génotype précoce et un génotype tardif et pour le scénario RCP 8.5

La température agit également sur la phénologie des plantes et dans le cas du blé elle détermine sa date de floraison (l'augmentation de la température va dans le sens d'une floraison plus précoce) et donc la période de sensibilité au stress thermique par la suite. Il nous semblait important d'aller vers des considérations plus finalisées et d'être capable de mieux appréhender les poids respectifs sur le rendement final de ces 2 effets « thermiques » de ces 2 effets antagonistes de la hausse des températures sur le blé: l'évitement de l'échaudage par avancée de la date de floraison et l'occurrence des stress thermiques. Pour cela nous avons mis en place une modélisation prédictive des effets du changement climatique sur le risque de perte de fertilité des épis dans une monoculture de blé. Une première tentative de modélisation de spatialisation des risques sur la France a été mise en place par Aurélie Grosperrin durant son CCD à partir des données météorologiques locales issues de projections climatiques disponibles sous DRIAS (http://www.drias-climat.fr/) et une modélisation de la floraison et du rendement du blé via le modèle Sirius [105]. Cette démarche a été appliquée pour toutes les préfectures de France métropolitaine et pour différentes combinaisons de génotypes, dates de semis et scénarios

climatiques (Figure 23a). Cette première approche a donné des résultats très encourageants comme la mise en évidence de l'influence forte de la précocité sur les risques de perte de fertilité et donc de la stratégie d'évitement plutôt que de résistance (Figure 23b), et doit être poursuivie notamment avec l'ajout de l'ombrage des arbres.

Le deuxième projet, Tree Cool Sheep (2018-2021), a été porté par l'unité mixte de recherche sur les herbivores (UMRH, Theix) et était principalement axé le comportement animal en période de canicule. En effet le comportement des animaux au pâturage en cas de fortes chaleurs est peu connu et résulte d'un compromis entre diverses motivations: ambiance thermique (microclimat) – alimentaire – sociale. Cette action visait ainsi à comprendre les éléments clés de l'environnement qui déterminent les décisions de positionnement de l'animal vis-à-vis de l'arbre dans la parcelle agroforestière. Ce projet est un peu en marge de mon projet de recherche car la composante « température » n'a pas été abordée via les approches que je développe. Il s'agissait plus ici de caractériser par la modélisation la dynamique spatiale du rayonnement transmis au sol par une strate arborée, prérequis essentiel pour aller vers des considérations thermiques via l'établissement du bilan d'énergie (Eq 1 et 2). Toutefois mon implication dans ce projet était l'occasion d'aller au-delà des échelles organes et canopée sur lesquelles je travaille habituellement puisque l'objectif était de simuler les processus sur des parcelles agroforestières

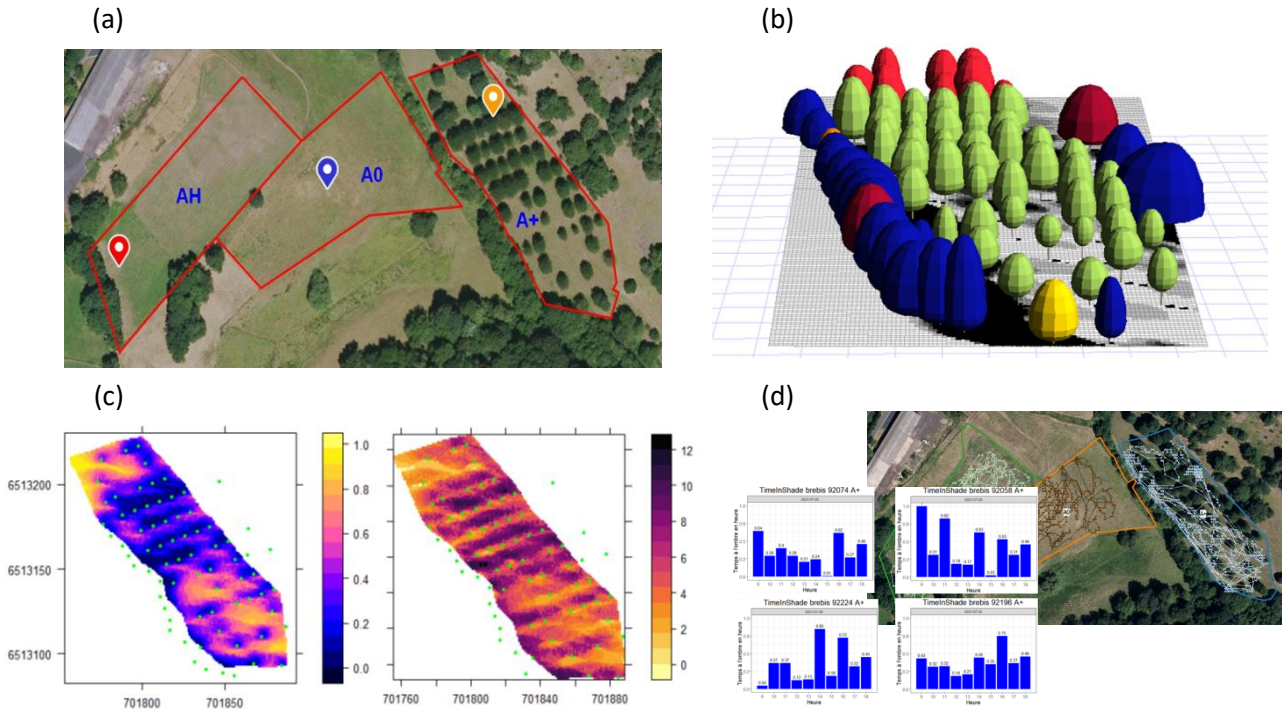


Figure 24 : Confort thermique - (a) Parcelles du dispositif expérimental utilisées dans le cadre du projet Tree Cool Sheep (2018-2021) (Theix). (b) Exemple de reconstruction de la parcelle A+ sous la plateforme Capsis. (c) Exemples d'indicateurs spatialisés de l'ombrage au sol sur la parcelle A+ : taux de transmis à gauche et cumul de temps horaire à l'ombre à droite. (d) Exemple de détermination du temps passé à l'ombre de brebis sur la parcelle A+ en couplant positionnement des brebis sur la parcelle A+ (tracés GPS) et localisation de l'ombrage [MS 66].

d'environ 8000 m² constituées de haies arborées (parcelle AH- Figure 24a) et d'une parcelle arborée de 60 tiges/ha (parcelle A+ - Figure 24a). Les modèles développés au sein de l'UMR PIAF (RATP, VegeSTAR) opèrent à une échelle spatiale fine, de l'ordre du centimètre, et peuvent être mobilisés pour simuler quelques arbres mais le coût informatique devient prohibitif à l'échelle parcellaire. Dans la communauté scientifique traitant des arbres, les modèles à l'échelle de la parcelle où les arbres sont individualisés incluant l'interception du rayonnement par les couverts ne sont pas nombreux. C'est un prérequis pour la spatialisation de l'ombrage. Les plus avancés et utilisés sont MAESPA [106] et la plateforme de modélisation Capsis [107]. La question de développer ou non un nouvel outil s'est posée mais il est vite apparu que la plateforme Capsis et plus particulièrement le modèle Heterofor [108] dédié à la gestion des peuplements forestiers avait de nombreux atouts pour analyser les processus à l'échelle parcellaire et répondre aux objectifs de cette action. En effet l'échelle de simulation usuelle dans Heterofor est la parcelle (i.e. l'hectare) pour des peuplements hétérogènes, de nombreux processus physiologiques sont formalisés, et la communauté Capsis est dynamique et internationale. De plus des collègues de l'UMR PIAF, Nicolas Donès et Philippe Balandier, se sont déjà engagés dans cette voie et ont contribué à la plateforme Capsis via le développement du modèle RReShar [109]. Dans ce contexte, je me suis engagé dans ce nouveau changement d'échelle via l'encadrement d'un stagiaire de MII, Chelton Desarmes en 2021. Dans un premier temps la structuration spatiale de 3 parcelles présentant des degrés de couverture arborées variés a été acquises : positionnement des arbres, forme, taille, et porosité des arbres dans les parcelles et des arbres de bordure (Figure 24b). A partir de ces données spatialisées et des données météorologiques locales, la simulation des dynamiques d'ombrages au pas de temps horaire et sur des mailles de 1 m² a été effectuée avec le modèle Heterofor. Des indicateurs spatialisés (cartographies- Figures 24c) ont été générés dont un indicateur de risque thermique pour les herbivores [110], et ont été couplés à des données de déplacement par suivi GPS de brebis (Figure 24d). Ce travail original a été présenté lors de la journée du réseau d'animation des chercheurs et développeurs francophones impliqués dans la modélisation des systèmes FORET-BOIS dans leurs environnements [MS 66]. Ces indicateurs associés à des observations de comportement des brebis sur le terrain seront analysés par l'UMRH, mais cette action m'a surtout permis d'initier des actions à l'échelle parcellaire sur lesquelles je souhaite m'appuyer pour mes futurs projets.

1.8. Angles d'inclinaison et mouvement des feuilles au vent

La structure de la frondaison joue un rôle important sur la variabilité spatiale du microclimat radiatif ou convectif [76] et donc sur les hétérogénéités de température via leurs rôles dans le bilan d'énergie (Eq. 2). Au cours de mes travaux, je me suis attaché à comprendre la part

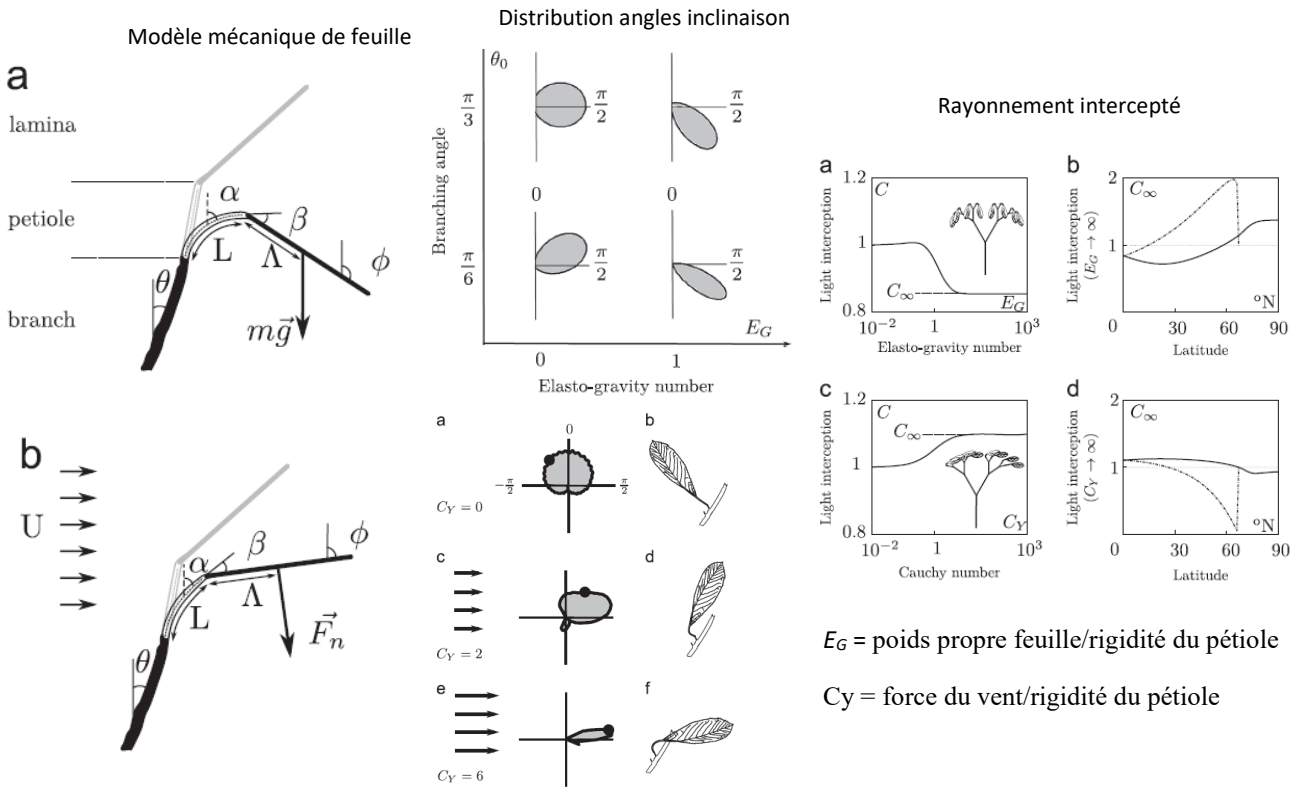


Figure 25 – Description du modèle de feuille simple utilisé pour définir la déformation d'une feuille sous l'effet (a) de son poids propre (gravité) et (b) du vent pour un angle d'insertion donné θ d'une feuille sur une branche. Conséquences de la gravité et du vent sur les distributions d'angle d'inclinaison et sur la quantité de lumière interceptée en fonction de la rigidité du pétiole [MS 23].

respective des composantes du microclimat sur la température des organes végétaux. Aussi bien à l'échelle des organes que du houppier, il apparaît que la structure joue un rôle important. La mesure ou l'estimation des traits structuraux est donc primordial pour paramétrer les modèles microclimatiques ou plus pratiquement pour guider les forestier, arboriculteurs fruitiers ou gestionnaires d'arbres urbains dans le choix des essences arborés ou de leurs conduites pour la fourniture d'un service écosystémique donné. Parmi les nombreux traits foliaires, les angles d'inclinaisons des feuilles, leur densité et leur niveau d'agrégation sont les plus importants [75]. Les distribution d'angles foliaires observés sont très variables d'une espèce à l'autre et peuvent changer au fil du temps pendant la saison de croissance ou en fonction des stress abiotiques et biotiques notamment le vent ou le stress hydrique [111] [112]. Cette variabilité est probablement due à des facteurs à la fois physiques et biologiques: l'architecture de l'arbre (à travers l'inclinaison des branches), la déformation des pétioles, qui dépend elle-même de la pression de turgescence, le phototropisme, l'historique de croissance et même les réactions instantanées aux stimuli. Pour rendre compte de cette grande variabilité, de nombreux travaux ont permis de quantifier les typologies de distributions d'angle foliaire des espèces forestières et fruitières et de les formaliser mathématiquement par des distributions sphériques, ellipsoïdales ou Beta [113] [114]. Toutefois ces travaux sont phénoménologiques et ne permettent pas d'expliquer cette

Figure 26 – Installation du cerisier dans la veine d'essai de la soufflerie atmosphérique du CSTB, Nantes. (1,2,3) Caméras rapides pour la capture du mouvement du feuillage. La caméra (3) sert à mesurer l'interception lumineuse. (4) Anémomètre à hélice. (5) Balance de mesure d'efforts à 6 composantes. (6) Opérateurs. [MS 10].

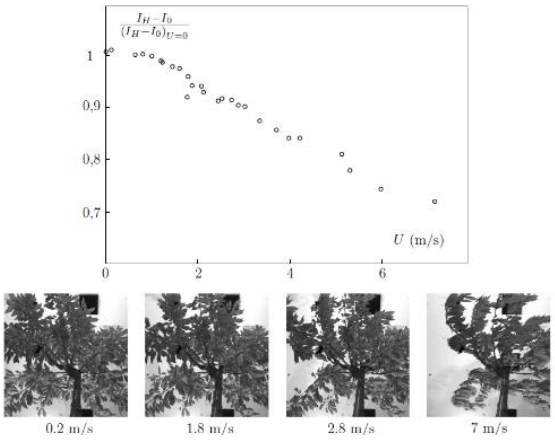


Figure 27 : Evolution du rayonnement intercepté par le cerisier en fonction de la vitesse du vent. Après un palier où le vent est trop faible pour affecter les feuilles de l'arbre, Jusqu'à 1 m.s^{-1} environ, le rayonnement intercepté diminue à cause de la reconfiguration des feuilles [MS 10].

variabilité ou l'évolution des distributions d'angles foliaires en fonction des stress notamment abiotiques : vent et stress hydrique.

Dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe MECA (BioMÉCAnique intégrative de l'arbre) de l'UMR PIAF, j'ai eu l'opportunité de travailler sur cette question de déterminisme des angles d'inclinaison foliaire en co encadrant la thèse de Loïc Tadrist avec Emmanuel De Langre du LadHyx (Ecole Polytechnique). Les hypothèses testées par Loïc durant sa thèse étaient que (i) les propriétés mécaniques du système feuille constitué d'un limbe et d'un pétiole (Figure 25) pouvaient expliquer les distributions observées et (ii) que ces propriétés expliquaient également le mouvement du feuillage au vent (changement d'angle d'inclinaison et dynamique).

Dans un premier temps, un modèle mécanique simple de déformation d'une feuille sous l'effet de son poids propre (gravité) et du vent (Figure 25) a été défini pour un angle d'insertion donné d'une feuille sur une branche [MS 23]. Ce modèle peut être soit résolu numériquement, soit résolu analytiquement dans le cas où la feuille est plus grande que le pétiole ($\Lambda \gg L$). Les prédictions ont été comparées à des angles d'inclinaison de feuilles artificielles, d'abricotier (« Précoce de Saumur ») et de ficus (*Ficus Benjamina*). La résolution numérique donne de très bons résultats alors que la solution analytique simplifiée permet d'estimer seulement l'évolution globale de l'angle foliaire en fonction de l'angle d'insertion du pétiole. L'utilisation de ce modèle permet alors de mieux appréhender les liens entre rigidité du pétiole, poids propre et vitesse du vent sur la déformation d'une feuille. Assez classiquement en physique, leur rôle respectif peut être appréhender par des nombres adimensionnels : le nombre d'élasto-gravitationnel, $E_G = \frac{\Lambda L m g}{EI}$, qui compare le poids propre d'une feuille et la rigidité du pétiole (EI) et le nombre de Cauchy, $C_y =$

$\frac{\rho U^2 \Lambda^3 L}{EI}$, qui compare le chargement lié au vent et la rigidité du pétiole (*EI*). Il est alors possible de prédire l'évolution des angles d'inclinaison des feuilles en fonction des ratios entre chargement gravitaire ou lié au vent et rigidité (Figure 25). Son utilisation dans un cas concret montre que l'interception du rayonnement diminue (ici de 18% au maximum) quand la rigidité du pétiole diminue (E_G augmente) et que cette interception augmente (ici de 10% au maximum) quand la vitesse du vent augmente (C_y augmente). Les niveaux maximums de variations dépendent de la position de soleil dans le ciel (Figure 23). Ces résultats montrent qu'il est possible de prédire des distributions d'inclinaison des feuilles à l'échelle d'un houppier sous le poids propre des feuilles à partir des mesures de traits allométriques à l'échelle foliaire incluant des mesures de rigidité et de masse. Par contre ces développements nous ont posé question dans le cas du vent car ils reposent sur de nombreuses hypothèses simplificatrices notamment que les branches ne bougent pas et que toutes les feuilles sont réparties aléatoirement sur la structure ligneuse et ont un mouvement synchrone. Afin de vérifier la pertinence de ces prédictions à l'échelle d'un houppier, des mesures de mouvement sous l'effet d'un vent devaient être entreprises sur des feuillages d'arbre. Des premières tentatives de mesures au champ et de manière simultanée de mouvement des feuilles et de vent ont été réalisées. Toutefois leurs exploitations n'ont pas été concluantes car en plein air, le vent varie fortement spatialement et temporellement et change de direction rapidement de sorte que mesurer la vitesse du vent à quelques mètres de l'arbre ne donne qu'une valeur approximative du vent que l'arbre subit. Des mesures en soufflerie ont donc été réalisées au CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) de Nantes sur un cerisier *Prunus cerasus* de variété *géant d'Hedelfingen* d'environ 3 m de haut [MS 10] (Figure 26). Ce cerisier a été choisi car c'est un arbre fruitier qui possède des feuilles assez flexibles et un couvert peu dense (son indice de surface foliaire, le LAI, valait environ 1). Il a été caractérisé géométriquement et mécaniquement. L'utilisation de la soufflerie permet d'envoyer sur l'arbre un vent assez constant et régulier (entre 0 et 7.5 $m.s^{-1}$) avec des paliers de vitesses très rapprochés, tous les 0,2 m/s environ, pendant une période de temps choisie suffisante pour l'acquisition de données vidéo exploitables. L'utilisation de caméras rapides positionnées sur le côté et sous le houppier avec des résolutions spatiales importantes (au minimum 1024 x 1024 pixels) a permis

de caractériser les dynamiques du feuillage et du rayonnement intercepté. L'analyse des images s'est faite via l'utilisation de l'outil KLT (CRtoolbox [115]) pour la mesure des vitesses et la décomposition bi-orthogonale (acronyme anglais BOD) afin de séparer des modes propres spatio-temporels en 2D [116]. Ainsi et pour la première fois un arbre entier, de taille respectable, a été soumis à des vents faibles dans une soufflerie atmosphérique pour mesurer le mouvement du

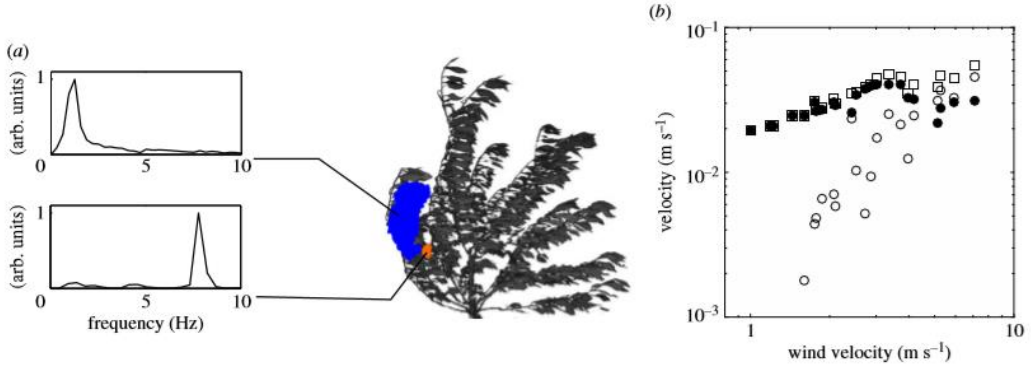


Figure 28 : Bi-Orthogonal décomposition du mouvement du feuillage avec extraction (a) des modes locaux (feuilles - orange) et globaux (branches - bleu), et déduction (b) des vitesses de feuilles (•), des branches (o) et de la totalité du feuillage (□) [MS 10]

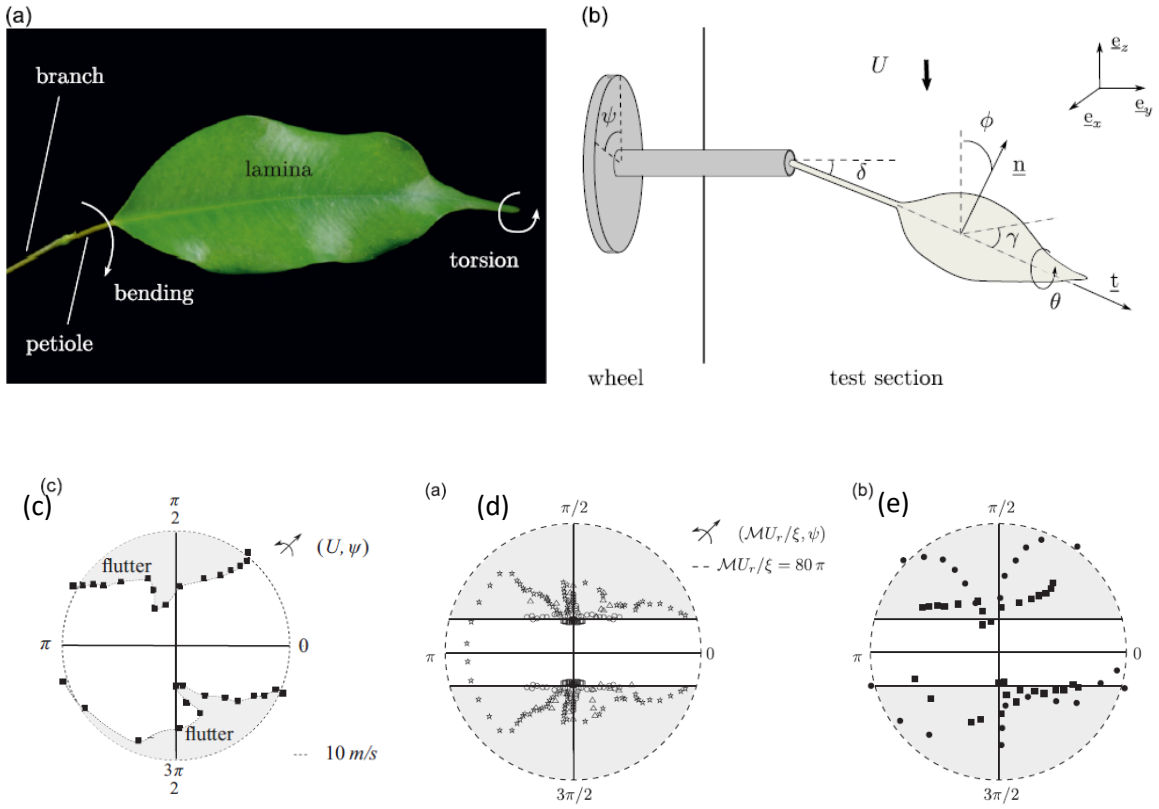


Figure 29 - (a) Eléments de la feuille et description du mouvement. (b) Vue schématique du dispositif et définition des angles utilisés pour définir la position de la feuille. (c) Domaines de flottement de feuilles de ficus en coordonnées polaires dans l'espace des paramètres vitesse du vent, *U*, et angle de la roue ψ : (U, ψ). Limite du galop en torsion prévu par le modèle et comparaison aux données expérimentales : (d) pour des feuilles artificielles et (e) pour des feuilles de ficus. L'aire grisée correspond aux zones de flottement prévues par le modèle [MS 19].

feuillage. Dans un premier temps, cette expérience a permis de prouver que l'interception lumineuse d'un arbre change avec le vent. L'interception lumineuse diminue de 30% pour une vitesse de vent de 7.5 m/s par rapport à l'interception lumineuse en conditions calmes (Figure 27). Cette observation est effectivement contraire aux prédictions faites par le modèle organe centré (Figure 25). Une analyse plus poussée du mouvement du feuillage a permis de montrer que ce changement d'interception lumineuse est principalement lié à la reconfiguration des feuilles (feuilles alignées selon la direction du vent), sans déformation de la structure ligneuse [MS 10]. L'utilisation de la BOD a permis de séparer les mouvements corrélés à grande échelle, liés au mouvement des branches, des mouvements corrélés à petite échelle, liés au mouvement des feuilles, et montré l'existence de différentes configurations du houppier en fonction de la vitesse du vent (Figure 28). A faible vitesse, seul le mouvement à petite échelle lié aux feuilles prédomine ave une faible dépendance du mouvement des feuilles à la vitesse du vent : les feuilles présentent alors un mouvement erratique, elles « flottent » au vent. A partir d'une certaine vitesse, la vitesse des feuilles diminue synonyme de l'arrêt du flottement des feuilles, commencent à se regrouper, et un mouvement à grande échelle se met place, les branches oscillent. Enfin à très grande vitesse toutes feuilles se reconfigurent et oscillent avec de grandes amplitudes suivant le mouvement des branches.

Les mesures en soufflerie ont suggéré l'existence d'un mode particulier de mouvement des feuilles à faible vitesse : le flottement induit par une instabilité aéro-élastique liée à la rigidité de la feuille et la force exercée par le vent. Ce mouvement n'intervient qu'à partir d'une certaine vitesse et se caractérise par un mouvement très régulier à une fréquence fixe. Afin de mieux caractériser ce mouvement, des feuilles de Ficus et des feuilles artificielles ont été placées dans une petite soufflerie et un mouvement de flottement en torsion a bien été observé à partir d'une certaine vitesse fonction de l'angle initial d'insertion de la feuille (Figures 29a, 29c, 29d, 29e). A partir du modèle de feuille décrit plus haut (Figure 29b), une étude aéro-élastique en torsion a permis de déterminer la vitesse de déclenchement de cette instabilité, U_c, en fonction des caractéristiques morphologiques et mécaniques du système feuille [MS 19] :

$$\frac{\rho}{m/S}\frac{U_c}{f_{0\xi}}\sin(\psi) > \frac{40\pi}{3} \qquad \text{(Eq. 10)}$$

Où *fo* est la fréquence d'amortissement en torsion du système mesurée suivant une méthode classique [117]. La comparaison du modèle avec les mesures sur feuilles isolées montre que ce modèle pseudo statique rustique permet de décrire la limite du domaine de stabilité de la feuille dans le vent (Figures 29d, 29e). Le peu de paramètres impliqués dans cette limite permet de conclure que le galop de torsion ou « flottement » est un mécanisme plutôt robuste quant à sa dépendance par rapport aux caractéristiques morphologiques et mécaniques du système. L'application de ce critère de déclenchement du mouvement de flottement aux feuilles du cerisier mis dans la soufflerie du CSTB a confirmé sa fiabilité (Figure 30).

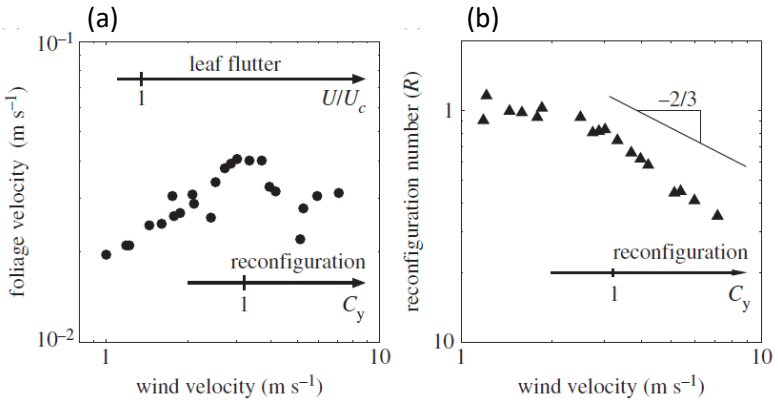


Figure 30 : Evolutions mesurées (a) de la vitesse des feuilles et (b) de la reconfiguration du feuillage en fonction de la vitesse du vent (o). Les lignes horizontales correspondent aux seuils de flottement et de reconfiguration prédits théoriquement [MS 10]

.

2. Projet de recherche – Sur la variabilité temporelle et les services écosystémiques

Il est difficile de se projeter sur plusieurs années tant le travail de chercheur est de plus en plus conditionné par l'obtention de financements sur projets avec une grande part d'aléatoire et sur l'opportunité de collaborations. Toutefois et globalement ma thématique de recherche principale restera la « **Variabilité spatiale et temporelle des températures des organes végétaux en lien avec l'architecture du couvert et le microclimat** », et portera sur l'étude des **interactions** entre le **fonctionnement de l'arbre, son environnement thermique et lumineux et son architecture**. Il me semble en effet que ce projet de recherche est en adéquation avec les grands questionnements et enjeux sociétaux actuels liés à la place de la végétation dans un monde devenu au fil des décennies trop anthropisé. Plus particulièrement mon projet de recherche va contribuer à répondre à **l'adaptation et la durabilité des systèmes de production arborés** (vulnérabilité aux stress thermiques et développement des ravageurs) et **des villes** (îlots de chaleur urbains) face à l'augmentation des températures issues des **changements globaux**. Il est en phase avec le projet de mon unité et de mon institut de rattachement puisqu'il vise à comprendre le **fonctionnement et l'évolution des agroécosystèmes**, et les évaluer, à leurs différentes échelles d'organisation. Le développement de l'agroécologie repose sur des agrosystèmes plus complexes de par leur hétérogénéité spatiale plus forte et la multiplicité des éléments qui les constituent (agroforesterie multi-strates ou environnement urbain par exemple). Cette complexité structurelle induit *de facto* des interactions positives ou négatives plus nombreuses aussi bien physiques que fonctionnelles. Ainsi appréhender ces systèmes plus complexes passe par la connaissance des mécanismes et interactions entre les différents éléments qui les constituent et la capacité à les modéliser. Mon projet de recherche vise ainsi avant tout à contribuer à mieux comprendre ces systèmes notamment sur **les plans thermique et fonctionnel**.

Dans ce cadre, mon projet de recherche peut se décliner en deux volets. Le premier est en ligne directe avec mes travaux passés. En effet certaines thématiques que j'ai abordé les années précédentes n'ont été qu'effleurées et des questions ou processus mériteraient d'être approfondis, d'autres mériteraient d'être resitués dans un cadre plus finalisé. Sur les processus à l'échelle des organes, la **formalisation de la spatialisation des transferts thermiques (libre ou mixte ou forcé)** à travers **la couche limite** reste un verrou scientifique important. C'est en effet un terme important du bilan d'énergie notamment dans le cas d'organes transpirants peu (fruits, parties ligneuses, ou feuilles stressées hydriquement) ou présentant un rapport surface/volume important (feuille, épi de blé par exemple) puisque que cela va être le seul processus à équilibrer l'apport

d'énergie par rayonnement. Sur cette spatialisation et à une échelle plus large, je souhaite également approfondir **la caractérisation des fluctuations thermiques** et des **conséquences fonctionnelles** au sein de la frondaison. En effet l'étude la dynamique des températures, observable à petite échelle (i.e. feuille, fruit), est très intéressante sur le plan cognitif mais le passage à l'arbre entier ou à la parcelle me paraît nécessaire dans le cadre des **questions de recherche plus finalisées** sur les liens entre **structure d'un houppier ou d'un couvert et les services ecosystémiques** potentiellement rendus. Ce questionnement de changement d'échelle, de l'organe à la canopée n'est pas nouveau mais reste complexe et mérite que l'on s'y intéresse. Il est à la base du développement de modélisation de type Structure-Fonction des plantes [118]. Toutefois, et sur la variable « température » du couvert, peu de travaux ont été développés et validés alors que sa connaissance et sa prédiction restent cruciales dans le cadre de l'adaptation des agrosystèmes aux changements climatiques. Le développement de l'infra-rouge thermique embarquée ou non en agriculture et en milieu urbain permettront certainement de mieux en comprendre le déterminisme et de valider les modèles de prédictions [119]. En effet des outils de mesures de plus en plus performants et portables permettent déjà de lier température de surface et géométrie [120]. Leur application à des couverts arborés ira vers une meilleure caractérisation de la variabilité spatiale des températures d'un couvert et une meilleure compréhension des liens avec sa structure et son environnement climatique. C'est en partie un objectif du projet ANR TIR4sTREEt qui a démarré en 2022 auquel je participe. L'analyse de ces données pour en extraire une information agronomique nécessite de mieux cerner les liens entre la structure, son fonctionnement et les températures observées. Les travaux que j'ai développés peuvent apporter des réponses pertinentes sur ce point, notamment via l'utilisation du modèle RATP [60] [MS6] intégré ou non dans des modélisations plus globale comme le modèle LASER.T [MS103]. Je m'attacherai à poursuivre **une approche « bottom-up »** et donc à étudier les processus de **l'échelle des organes à l'échelle de la frondaison**, et la modélisation sera toujours mise en avant.

Le deuxième volet concerne une velléité d'aller vers une **analyse plus fine des temporalités** aux sens large et les liens avec **la structure de la frondaison**. En effet, et rétrospectivement, mes travaux ont surtout été axés sur la variabilité spatiale plus que sur la variabilité temporelle. Une certaine temporalité est bien présente mais elle reste confinée à une échelle de temps horaire et découle de la nécessité d'appréhender les extrêmes thermiques subis par les végétaux qui surviennent généralement sur des pas de temps infra journalier. Plus formellement j'ai abordé ces dynamiques temporelles (c'est également le cas dans la littérature) en me basant sur une approche quasi-statique (états stationnaires successifs sans transitoire) des processus physiques ou des réponses fonctionnelles aux fluctuations de l'environnement. Par exemple, une des hypothèses

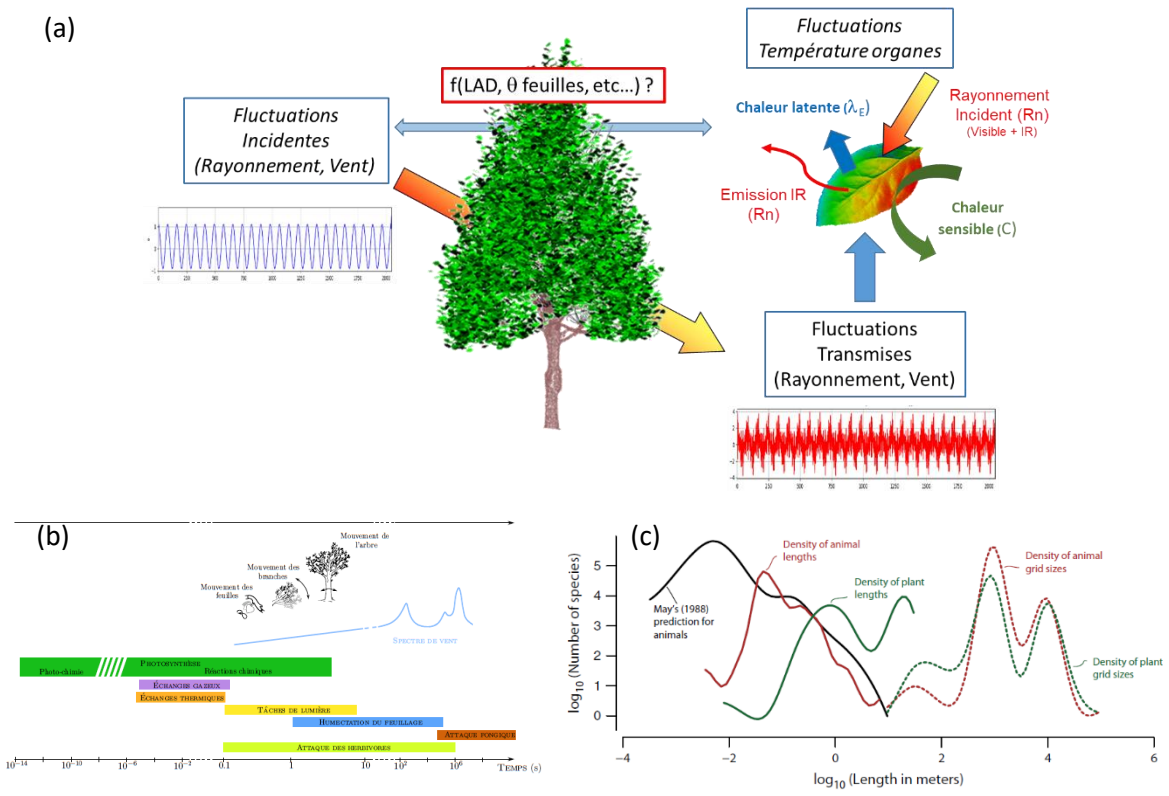


Figure 31 – (a) Question de recherche sur l'impact des fluctuations du microclimat induites par la structure d'une couvert arboré sur les dynamiques thermiques des organes et les conséquences fonctionnelles. (b) Echelles de temps de certains processus biologiques comparées aux échelles de temps des mouvements d'un houppier [Thèse Loïc]. (c) Echelles de longueurs caractéristiques des animaux et plantes (traits pleins) et des échelles d'espaces (pointillés) utilisées par les modèles de prévisions de l'impact des changements climatiques sur ces organismes [19].

sous-jacente au modèle RATP est que tous les flux associés au bilan d'énergie (Eq. 2) sont à l'équilibre à l'échelle foliaire. Ce postulat conditionne le pas de temps des simulations qui ne doit pas être inférieur à l'échelle de temps la plus grande, ici le temps d'adaptation de la régulation stomatique aux nouvelles conditions locales (température, rayonnement, hygrométrie). Or les phases transitoires liées à des déséquilibres induisent potentiellement des états instantanés qui peuvent être largement différents de l'état du système à l'équilibre. Dans mes travaux seuls les aspects diffusifs au sein des organes végétaux volumiques sont effectivement instationnaires. En effet le phénomène de diffusion, s'il a le « temps » d'opérer, réduit les extrêmes de température mais induit un déphasage qui peut favoriser des gradients comme explicité dans le cas des températures des fruits ou des troncs. Sur les processus fonctionnels, ces états transitoires sont responsables, par exemple, d'une désynchronisation entre le taux d'assimilation du carbone et le contrôle stomatique au niveau foliaire. La photosynthèse, notamment au niveau des centres réactionnels, réagit très rapidement (millisecondes) aux changements de l'environnement [121] alors que la réponse de la régulation stomatique est plus lente (minutes) [122]. Cela conduit à une efficience d'utilisation de l'eau très variable et largement différente du cas où assimilation de

carbone et contrôle stomatique sont en équilibre avec l'environnement [123]. L'effet des fluctuations du rayonnement sur les échanges gazeux a beaucoup été étudié car la part de la lumière dite « fluctuante » sur la totalité de la lumière absorbée par un couvert est importante car représente entre 10 et 80% du PAR transmis par un houppier aux feuilles qui sont la plupart du temps à l'ombre [77]. Le pendant sur la température reste à faire alors qu'une température variable a également un impact sur la réponse photosynthétique comparativement à une température constante moyenne équivalente [124]. Mon projet sur la temporalité vise ainsi l'échelle des organes et l'échelle du couvert. Si à l'échelle des organes une formalisation d'un **bilan d'énergie instationnaire** semble possible à partir des équations régissant les échanges d'énergie (Eq 1 et 2), le passage à l'échelle du couvert apparaît plus ardu. En effet les formalismes utilisés pour décrire les traits structuraux des houppiers déterminant la capacité d'interception (et donc de transmission) du rayonnement et d'atténuation du vent, sont basés généralement sur des approches de type milieu continu [125]. Les traits foliaires sont ainsi caractérisés par des grandeurs statistiques (moyenne et variance) par unité de volume : densité foliaire, distribution angulaire, agrégation (clumping) qui vont déterminer la probabilité d'interception ou la porosité locale [74]. Cette approche n'est certainement pas la plus pertinente pour décrire des fluctuations locales très dépendantes des petites échelles spatiales (trouées) mais elle est inévitable dès lors que l'on s'intéresse à de grands arbres où il est impossible d'individualiser tous les organes végétaux. L'utilisation des modèles architecturés de type structure fonction et les récents développements dans l'analyse des nuages de points issus de d'acquisition par Lidar [126] permettront certainement d'avancer sur la conceptualisation des relations entre traits foliaires, fluctuations des composantes du microclimat et des températures. Associés à des mesures de terrains, ce projet constitue une perspective intéressante à mon travail qui serait à développer dans le cadre d'un projet de thèse par exemple (Figure 31a). Plus généralement et comme évoqué, l'apparition ou non d'un transitoire dépend des rapports entre échelles de temps des processus étudiés et des processus de forçage, et pose la question de l'échelle de temps minimale à utiliser dans les modèles écophysiologiques ou plus généralement dans les modèles de prédiction du devenir des plantes en fonction du climat futur. Un état des lieux ou bilan des échelles de temps d'intérêts dans le fonctionnement des plantes serait à engager. En comparaison les échelles spatiales ont été largement étudiées notamment dans le cadre des effets des changements globaux sur les organismes ([19] - Figure 31c). Dans le cadre du travail de Loïc Tadrist sur le mouvement du feuillage, nous avions commencé à analyser rapidement les échelles de temps de certains processus biologiques mais cet état des lieux n'était que superficiel et donc insuffisant (Figure 31b). Un travail très intéressant a été mené sur ce sujet par Chazdon et al. [77] mais cette étude

s'est focalisée sur un seul processus : la photosynthèse, un seul facteur : le rayonnement, et un organe végétal : la feuille. L'élargissement au facteur thermique et à d'autres organes : tiges, bourgeons, fruits, me paraît une voie intéressante à suivre. Cette analyse permettrait donc de mieux appréhender **l'échelle de temps minimale** nécessaire pour représenter les processus mais en corollaire de **borner les échelles spatiales** à appréhender dans les approches de modélisation. Ces questions d'échelles temporelles posent également des questions sur les méthodologies d'analyse des signaux temporelles. Des outils mobilisés dans le cadre de la thèse de Loïc sont accessibles et pertinents, et ma formation en turbulence m'a également formé à la mise en œuvre d'autres méthodes comme la transformée de Fourier ou l'analyse en ondelettes. Leurs applications aux signaux temporelles perçus par les arbres et ses organes me paraît souhaitable. De nombreux processus peuvent être ainsi étudiés dans leurs phases transitoires. Pour ma part et sur le long terme, je compte principalement rester concentré sur **les processus thermiques** (diffusion, changement de phase) et **sur les composantes du microclimat en lien ou non avec le mouvement de la frondaison** (intermittence du rayonnement) et des conséquences de cette dynamique sur **les stress thermiques** dans des contextes variés sur lesquels j'ai déjà établi des partenariats dans le cadre de projets passés ou en cours : émission COV sur la qualité de l'air, les « échaudures » au sens large sur blé ou fruits, les microhabitats des ravageurs et le bien-être des organismes.

Enfin les systèmes de production s'orientent de plus en plus vers des systèmes hétérogènes spatialement : agroforesterie, culture sous panneaux solaires [127], peuplement forestiers hétérogènes [MS 15], production en milieu urbain, qui vont *de facto* induire des fluctuations des conditions microclimatiques qu'il faudra caractériser tout comme les réponses fonctionnelles. S'engager sur ces thématiques nécessite également d'appréhender l'hétérogénéité spatiale inhérente de ces systèmes et donc d'aller vers des échelles plus larges et a minima la parcelle. Mes premiers travaux dans le cadre du confort thermique en ville et des animaux et des céréales sur les systèmes agroforestiers vont dans ce sens et je souhaite les développer en y ajoutant les aspects thermiques via le bilan d'énergie.

Sur quelques un de ces points, des projets sont déjà engagés ou sont en phase de l'être. Je les expose ci-dessous. Ils permettent de donner un aspect plus concret à mon projet.

Axe 1 – Températures gélives et dynamique de la prise en glace dans les organes ligneux

A l'échelle des organes végétaux, j'avais entamé à mon arrivé au sein de l'UMR PIAF des expérimentations afin de mieux caractériser les dynamiques thermiques au sein de troncs d'arbre en termes d'amplitudes thermiques perçues localement, leurs variations au cours de la journée en

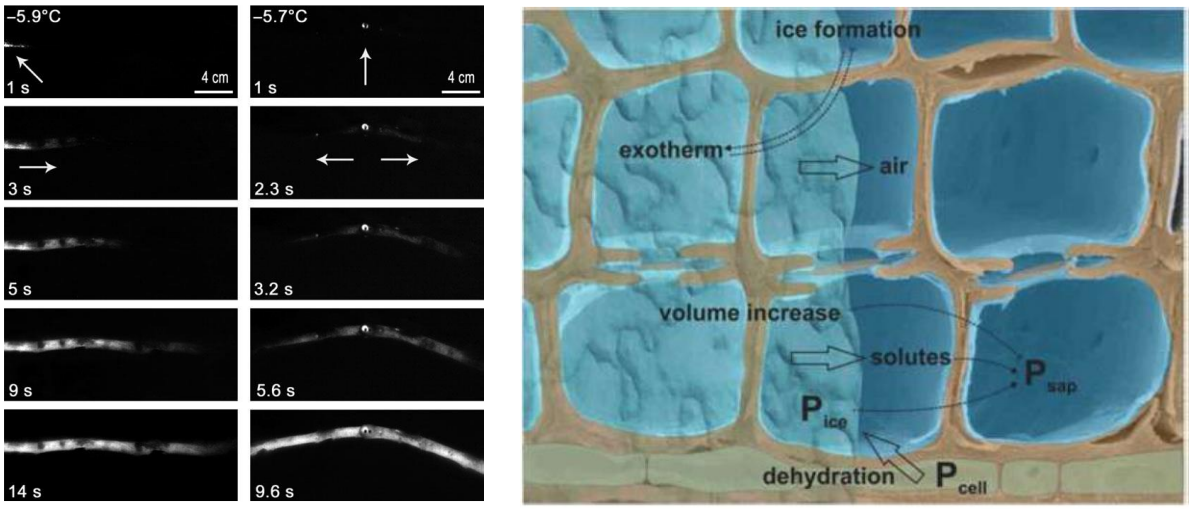


Figure 32 – (a) Propagation typique de la glace suivie par thermographie infrarouge dans des branches de Picea abies après initiation artificielle d'un point de glace à une extrémité (colonne de gauche) ou au centre de l'échantillon (colonne de droite). Les flèches indiquent les points de nucléation de la glace et les directions de sa propagation. Dans la séquence d'images, la température au moment de la nucléation et le temps après la ou les nucléations sont indiqués [MS 17]. (b) Illustration de la formation de glace (partie gauche de l'image) dans des tissus ligneux et processus associés : augmentation de la température (exotherme), augmentation de volume avec diminution de la tension dans la sève (P_{sap}), augmentation de la concentration des solutés lié au flux d'eau des tissus (potentiel hydrique P_{Cell}) et du xylème (P_{sap}) vers le front de glace (potentiel hydrique P_{ice}) [128].

fonction de l'insolation, l'intensité et la durée des gradients spatiaux, et l'occurrence d'évènements gélifs au sein des tissus. Cette action s'intégrait dans une étude plus globale de la vulnérabilité des espèces ligneuses au froid, thématique portée par Thierry Améglio et Guillaume Charrier de l'UMR PIAF. [MS 18]. Thématique qui est cruciale pour la compréhension de la **capacité d'adaptation et de résilience des espèces ligneuses aux changements globaux**. Cette vulnérabilité est en partie liée à la **prise en glace de l'eau** contenue dans les parties ligneuses et à l'apparition d'embolie dans les vaisseaux conducteurs, et de la capacité des espèces à résister ou à réparer cette embolie. Le processus de prise en glace est intéressant d'un point de vue physique par son aspect **multiphasique (eau, glace et gaz)** mais aussi par les **échelles de temps** mises en jeu. En effet la prise en glace et sa propagation sont des processus rapides. L'apparition de point de glace se fait sur un temps inférieur à la milliseconde, le vocable « d'évènement » de gel est ainsi souvent usité car plus adapté, et sa propagation dans les tissus ligneux est de l'ordre de 3 $cm.s^{-1}$ (Figure 32a) [MS 17]. La **prédiction de ces évènements gélifs** nécessite de mieux comprendre les mécanismes responsables de la **propagation du front de glace** et sur son apparition en termes d'**occurrence, de localisation et d'intensité**. Le financement d'un projet ANR franco-Autrichien sur les mécanismes de résistance des ligneux au stress gélif, l'ANR Acoufollow (2021-2024), porté par Thierry Améglio me permettra d'avancer sur l'analyse et la modélisation de ces évènements gélifs en lien avec l'environnement microclimatique et la structure des arbres. En effet, le projet Acoufollow s'appuie à la fois sur des données *in natura*

(limite d'altitude) et en chambre climatique contrôlée en s'appuyant sur les outils utilisés et développés dans le précédent projet ANR-FWF "Acoufreeze" : émission ultrasonique (UE), thermographie infrarouge, thermocouples et analyse dendrométrique. L'objectif général de ce projet est d'étudier (i) **la dynamique de la prise en glace** et (ii) **les mécanismes de réparation** (mise sous pression locale) en relation avec des facteurs environnementaux. Les conséquences potentielles sur les processus de croissance et les risques de gel doivent être également abordées. Plus spécifiquement la tâche que je porte vise à simuler l'influence respective des **différentes variables (température, pression osmotique)** et **mécanismes physique (flux thermique et hydrique, changement de phase)** sur le mécanisme de prise en glace et de sa propagation au sein d'une architecture de tige simple (Figure 32b) [128]. Pour mener à bien ce projet, j'encadre, Cyril Bozonnet, un post-doctorant sur 2 années en charge de simuler les cycles de gel-dégel au sein d'une structure simplifiée. Les simulations seront effectuées à l'aide du logiciel COMSOL multiphysics, qui est un logiciel de simulation à usage général (https://www.comsol.eu), pour analyser les flux d'eau et la propagation du front de glace à l'échelle locale ($\sim 10^{-4}$m) d'un ensemble constitué d'un vaisseau xylémien et des fibres attenantes. Les différents mécanismes physiques seront traités en utilisant des modules dédiés de COMSOL: le module de transfert de chaleur qui prend en compte la diffusion de la chaleur et le changement de phase (Eq 1), et le module de mécanique des structures qui permet l'expansion des parois due à la pression de l'eau. Cette approche nous permettra de tester les mécanismes putatifs (pression cryostatique, pression osmotique) qui pourraient prédire les schémas de pression de la sève xylèmienne observés. Toutefois cette approche ne pourra pas être extrapolée à l'échelle d'un rameau ou d'une branche notamment à cause du coût numérique de telles simulations. Le changement d'échelle passera par une approche plus globale comme celle publiée par Graf et al. (2015) [129]. Toutefois l'approche très mathématique de Graf, et al. (2015) présente au moins 2 inconvénients majeurs. Elle repose sur une répartition homogène des vaisseaux et des fibres au sein d'une branche ou d'un tronc et elle reste coûteuse numériquement. Afin de s'approcher au mieux de la structure réelle d'une branche ou d'un tronc (écorce, aubier, bois de cœur) qui conditionne également la répartition spatiale de la teneur en eau des tissus, une approche de type structure-fonction basée sur des unités fonctionnelles (vaisseau et fibres attenantes) et couplées entre elles hydrauliquement et thermiquement me paraît plus pertinente pour une utilisation en situation. *In fine*, le paramétrage des unités fonctionnelles pourra se faire à partir des données issues de la littérature, des expériences issues du projet AcouFollow, et des simulations issues des échelles fines, i.e. via le logiciel Comsol Multiphysics. L'approche plus globale permettre de simuler et

de restituer à une échelle temporelle de l'ordre de la minute des dynamiques des flux d'eau en lien avec les fluctuations du microclimat subi à la surface d'une branche ou d'un tronc.

Axe 2 – Les arbres urbains

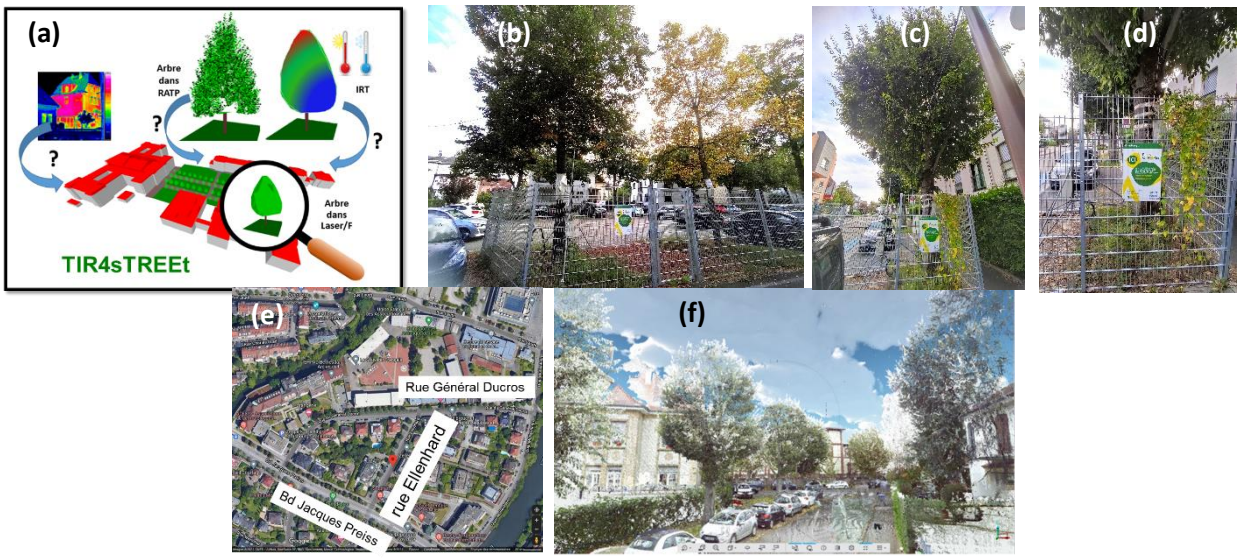


Figure 33 : (a) Illustration du projet ANR TIR4sTREEt (2021-2024). Arbres modèles ciblés dans 3 rues de Strasbourg (e) : Tilleuls (b), Micocouliers (c), Platanes (d), dans le cadre de ce projet dont la transpiration et la structure foliaire seront mesurées par des flux de sève et des acquisitions Lidar respectivement. (f) Exemple d'une acquisition par lasergrammétrie d'une des rues.

Les 4 années de travail sur les arbres urbains via le projet ANR CoolTrees que j'ai coordonné, nous ont permis collectivement d'avancer sur **l'intégration des arbres**, dont leur **physiologie**, dans la **modélisation des échanges thermo radiatifs à l'échelle d'une rue** [MS 103], et elles m'ont aussi convaincu de la nécessité de poursuivre ces travaux sur les ilots de chaleur urbain et au-delà. En effet le rôle des arbres en milieu urbain est encore un sujet d'actualité car il reste de nombreux travaux à mener sur le plan scientifique sur leurs effets sur le climat urbain (**qualité de l'air** par exemple), sur la durabilité des arbres dans ce milieu très contraignant (**stress hydrique** notamment), et sur des aspects opérationnels comme le développement de modèles numériques permettant de guider le choix des essences en ville, des systèmes de plantation, de l'irrigation et du suivi de la croissance des arbres (voir le projet d'aménagement de la rue Garibaldi (https://parolesdelus.com/actualites/smart-territoires/semaine-europeenne-du-developpement-durable-a-lyon-on-connecte-arbres-et-poubelles-pour-rafraichir-la-ville-et-optimiser-les-tournees/), projet où l'UMR PIAF était partenaire). Dans un premier temps je souhaite poursuivre sur les liens entre ICU et ombrage et transpiration en continuant la validation du modèle LASER.T et son développement notamment sur les **aspects fonctionnement hydriques et résistance à la sècheresse**. Sur ce point mon implication dans le projet ANR Hydrauleaks porté par H. Cochard de l'UMR PIAF est un atout. En effet un modèle de fonctionnement hydrique d'un arbre, modèle Sureau [130], issu de ce projet ANR a été développé

et pourra être porté et intégré au modèle LASER.T. Le langage informatique commun, le C++, et les formalismes utilisés par ces deux modèles suggèrent un couplage réalisable à court terme. Des aspects plus fondamentaux comme la **formalisation des équations des transferts thermo-radiatifs dans l'infra-rouge terrestre entre un feuillage et des surfaces minérales** (bâtiment par exemple) reste également un verrou.

Pour avancer sur ce point, je vais participer activement au projet ANR TIR4sTREEt (2022-2025) porté par l'INSA de Strasbourg (Figure 33). L'objectif principal de ce projet est de compléter la démarche mise en œuvre antérieurement dans le projet ANR CoolTrees sur les volets acquisitions des traits architecturaux et fonctionnels et sur un volet modélisation. Une des difficultés rencontrées lors de l'étude des arbres en milieu urbain est le manque de données sur les distributions des températures foliaires des houppiers. Le projet TIR4sTREEt vise justement à développer une approche originale d'acquisition simultanée de la structure par LIDAR terrestre et des températures par imagerie infra-rouge et de fusionner ces 2 informations. Si la fusion des informations géométriques et thermiques est envisageable sur les façades, elle reste un verrou sur des objets vivants et complexes tels que les arbres. Suivant l'avancement, l'estimation des traits foliaires (le LAI, Leaf Area Index, par exemple), à partir de données de nuages de points 3D pourra être approfondie au regard des résultats prometteurs [MS 11]. Elle pourrait bien compléter et à terme se substituer aux méthodes classiques souvent chronophages (établissement de relations allométriques, LAI2000) ou inadaptées à des arbres urbains à couvert épars. Cette méthodologie va être appliquée sur 3 essences d'arbres (Micocoulier, Platane, et Tilleul) dont le fonctionnement sera également mesuré via des capteurs de flux de sève et des dendromètres. Les températures des feuillages seront simulées par le modèle LASER.T en prenant en compte l'environnement bâti et la structuration des houppiers via le formalisme issu du modèle RATP. Un point clef de ce projet sera d'utiliser la comparaison avec les données infra-rouge spatialisées afin d'avancer sur la mise en équation des transferts thermo-radiatifs dans l'infra-rouge terrestre entre un feuillage et un bâtiment. L'objectif final étant de parfaire les capacités de prévision de la simulation de l'impact physique des bâtiments et des arbres (évapotranspiration, températures de surface) sur le microclimat urbain notamment sur les températures ressenties. Pour mener à bien cet objectif mes collaborations actuelles avec l'unité propre EPhor d'Angers, implication dans le suivi de thèse de M'Ballo [131] et co direction de la thèse de Dorine Cannone, seraient certainement à renforcer.

Axe 3 –Vulnérabilité aux stress thermiques des systèmes de production arborés comme l'agroforesterie.

Dans un contexte de changement global, une première étape **d'adaptation des agroécosystèmes aux futurs changements climatiques** consiste à **réduire l'exposition à la variabilité du climat actuel et futur** [14]. Je souhaite continuer sur l'étude du rôle des arbres dans la mitigation des risques de stress thermiques engagée très récemment dans le cadre du projet structurant d'avenir CAP 20-25 du site de Clermont-ferrand [MS 77].

Sur le premier volet, le projet TreeCoolWheat, axé sur la mitigation de l'échaudage, nos premiers travaux montrent clairement le potentiel de mitigation des arbres. Toutefois ce potentiel doit être replacé dans un cadre plus opérationnel ou finalisé prenant en compte explicitement la **structuration d'un parcellaire agroforestier**. La difficulté, qui rend également cet objectif intéressant scientifiquement et intellectuellement, est que les nombreux processus impliqués nécessitent l'explicitation d'échelles spatiales (du m² à la parcelle) et temporelles (de la minute au mois) variées. La méthodologie envisagée reposera sur la modélisation (i) **du microclimat spatialisé sous couvert agroforestier** et (ii) **de la phénologie du blé** dont la floraison et du rendement (Figure 34). Sur le microclimat mes récents travaux sur le bien-être animal ont montré la faisabilité de la spatialisation du microclimat radiatif via l'utilisation de la plateforme Capsis (Figure 24b). Le verrou scientifique sera ici de **spatialiser également le flux convectif** (Eq 4) à l'échelle de la parcelle notamment en situation caniculaire ou le régime d'écoulement est de type libre, i.e. les mouvements d'air sont induits par les gradients thermiques. A ma connaissance les problématiques de convection libre n'ont jusqu'à présent pas été abordés du fait du couplage fort avec la température des couverts. Ainsi et au niveau du paysage institutionnel, seule l'UMR ISPA à Bordeaux travaille déjà sur la problématiques « vent et arbres » en milieu forestier mais essentiellement dans le cadre des vents forts sur la diffusion des spores ou des dégâts liés aux tempêtes, i.e. en situation de régimes convectifs forcés [132]. L'analyse des mouvements convectifs d'origine thermique reste donc à faire dans le contexte agroforestier en présence de

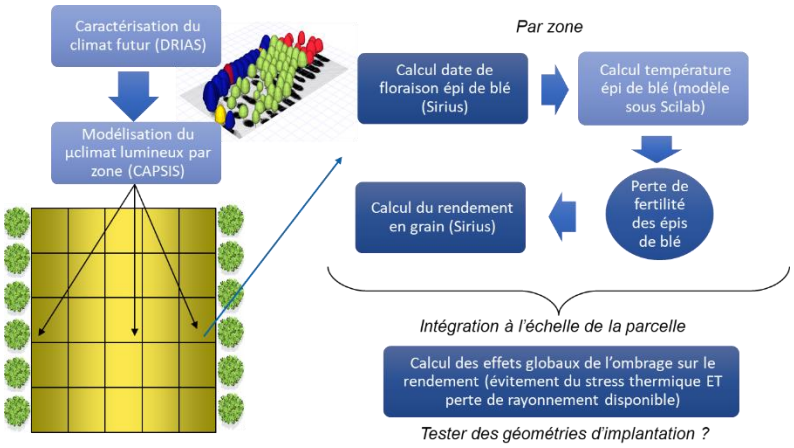


Figure 34 : Projet Futur - Modélisation d'une parcelle agroforestière : vers la prise en compte complète des effets de l'ombrage sur la performance du blé

céréales et pourrait faire l'objet d'une thèse en collaboration avec les collègues de l'UMR GDEC et de l'UMR ISPA. Ce projet pourrait avoir des applications plus larges notamment en milieu urbain et n'est pas déconnecté de l'axe 2 de mon projet.

3. Curriculum Vitae

Nationalité	France
Date de naissance	14 Septembre 1974
Famille	Vie maritale. Trois enfants
Adresse	INRAE Clermont-fd
Profession	Chercheur à l'INRAE
Fonction	Chercheur INRAE/Département AgroEcoSystem/ UMR 0547 Physique et Physiologie Intégrée de l'Arbre en environnement Fluctuant. Animateur de l'équipe Micro-Environnement et Arbre (MEA)
Thématiques scientifiques	Ecophysiologie, bioclimatologie / Services Ecosystémiques / Modélisation
Spécialités	Physique, microclimat, architecture, arbre, bilan thermique, transfert masse, transfert énergie.
Reviews	*Agricultural and Forest Meteorology* *Frontiers* *Urban Forestry & Urban Greening* *Scientia Horticulturae* *Trees Structure and Function* *Remote Sensing*

Carrière

Avril 2004 - Avril 2005

Ingénieur d'Etudes au C.E.R.F.A.C.S. (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) au sein du groupe Computational Fluid Dynamics:

1- Expertise CFD multiphysique : turbulence, combustion, diphasique et acoustique et modélisation associée (LES et RANS) - transfert de technologie - coopération Snecma Moteurs/Cerfacs. Audit pratiques de calculs.

2- Gestion relations Snecma Moteurs/Cerfacs. Calculs aérothermiques instationnaires de foyers aéronautiques. Mise en place et gestion d'un code de calcul pour plusieurs utilisateurs. Suivi, recommandations et développements code de calcul. Développements outils de pré et post-processing en fortran 77/90 et d'un site web. Portage codes sur plateformes : ClusterPC (Linux), SGI, SUN, Serveur Alpha.

3- Encadrement, formation et soutien (théorie et numérique) de stagiaires et thésards en CFD.

Avril 2002 - Avril 2004

Contrat Post-Doctoral au C.E.R.F.A.C.S. (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) au sein du groupe Computational Fluid Dynamics:

1- Etude numérique des tourbillons de sillage:
Adaptation d'un code DNS/LES (NTMIX-3D) pour la prise en compte de maillage non uniformes.Simulations temporelles par LES de l'évolution du champ proche étendu au champ lointain des tourbillons de sillage. Travaux effectués dans le cadre du projet européen C-WAKE.

2- LES en combustion prémélangée
Travaux sur les conditions limites turbulentes. Couplage RANS/LES en combustion turbulente. Etude numérique du couplage acoustique-combustion pour une flamme de prémélange.

1998 – 2002

Etude doctorale à l'I.M.F.T. au sein du groupe écoulement et combustion (E.E.C.) :
« Analyse de la dynamique des jets à densité variable en écoulement cocourant pulsé ».

1 – Simulations numériques par une approche statistique (RANS) d'une expérimentation menée à l'I.M.F.T.

2 – Confrontation des approches expérimentale et numérique pour l'analyse physique d'un écoulement de jet turbulent à densité variable soumis à de fortes accélérations.
3 – Exposés de travaux (congrès, séminaires)

1996 – 1997 (6 mois) **Stage de D.E.A. au C.E.R.F.A.C.S.** (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) au sein du groupe Computational Fluid Dynamics :

« Etude numérique de l'évolution et de la stabilité d'un écoulement tourbillonnaire compressé. Application à l'aérodynamique interne des moteurs à pistons. »
1 – Simulation numérique directe.
2 – Analyse physique d'un tourbillon compressé.

1995 (3 mois) **Stage de Maîtrise** au sein de l'entreprise Elf Aquitaine Production sur le site de l'usine de Lacq (64) :

« Compréhension et résolution de problèmes de cavitation au niveau de pompes centrifuges ».

Activités d'encadrement (en cas de co-encadrements, préciser les pourcentages)

➢ Etudiants en thèse : 5

1. **Octobre 2021-** : Co-encadrement (**25%**) de Dorine Canonne, thèse de l'université d'Angers Agrocampu Ouest sur le choix des espèces d'arbres adaptées pour résister aux épisodes de sécheresse et de chaleur en ville et atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain.
2. **Octobre 2015-Octobre 2018** : Co-encadrement **(33%)** de Elena Bournez thèse à l'Université de Strasbourg sur la modélisation du rôle des arbres sur le microclimat urbain.
3. **Octobre 2011 – Octobre 2015** : Co-encadrement **(50%)** de Loïc Tadrist inscrit à l'Ecole Polytechnique (encadrement par Emmanuel de Langre, Ladhyx) sur la dynamique vibratoire des feuilles et les conséquences sur la dynamique de fonctionnement d'un couvert (photosynthèse, transpiration) et sur le développement des maladies.
4. **Octobre 2008 – Octobre 2011** : Encadrement **(75%)** d'Alexandre Leca (25% par André Lacointe UMR PIAF) issu d'un master de physique spécialité « Physico-Chimie de l'Atmosphère et du Climat » a obtenu une bourse MRES de l'école doctorale des sciences de la vie de Clermont-Ferrand sur le sujet intitulé "Interactions dynamiques entre architecture du pommier et développement des épidémies de tavelure. Modélisation physique de la durée d'humectation et du développement intra-couronne de l'épidémie".
5. Co-encadrement **(50%)** en **2009** avec D. Biron (post-doc Haigneré au sein de l'UMR PIAF) d'une étudiante brésilienne en thèse, A. Scomparin, sur le développement d'un ravageur du pommier : Cydia Pomonella (le Carpocapse) sur l'impact de conditions thermopériodiques sur les performances du ravageur et ses capacités de thermorégulation, et application de ces nouvelles connaissances sur la prévision des risques d'émergence du papillon.

➢ Etudiants en Master : 13

6. Encadrement en 2021 avec d'un étudiant de master II ST2AE-GEEFT à AgroParisTech Montpellier (Chelton Desarmes) sur la modélisation de la dynamique d'ombrage sur une parcelle agroforestière.
7. Co-encadrement (50%) en 2019 avec Andrée Tuzet (UMR ECOSYS) d'une étudiante de master II d'AgroParisTech – Université Paris –Saclay, parcours « Climate, Land Use and Ecosystem Services » (Alice Maison). Intitulé du stage "Understanding of the hydric functioning of vegetation in an urban park »

8. Co-encadrement (33%) en 2018 avec Jérôme Ngao et Philippe Malagoli de l'UMR PIAF d'une étudiante de master II de Université Clermont Auvergne (Clémence Agaccio) sur le « Microclimat radiatif et thermique: quels impacts sur le développement foliaire et la répartition de l'azote au sein de la couronne chez le pommier (Malus pumila Mill.) ? »
9. Co-encadrement (33%) en 2016 avec Pascale Goupil de l'UMR PIAF et de Claire Richard de l'Institut de Chimie de Clermont-Ferrand d'un étudiant de master II (33%) de Université Clermont Auvergne (Thomas Raymond) sur la photodégradation de l'ASM sur plants de pommier et impact sur son activité SDP.
10. Co-encadrement en 2014 du stage de fin d'étude (25%) avec Laurent Brun de l'UERI de Gotheron d'une étudiante de VetAgroSup (Margot Dulais) sur les impacts de bâches anti-pluie sur le microclimat et le développement du monilia de l'abricotier
11. Encadrement en 2013 du stage master I de G. Babindamana étudiante en Master 1 Statistique et Traitement des Données Analyse de sensibilité et association d'un niveau d'erreur aux prédictions d'un modèle plante hôte / parasite.
12. Co-encadrement en 2012 du stage de fin d'étude (50%) avec Luciana Parisi de l'UERI de Gotheron d'une étudiante ingénieure de l'ENITAB (Julie Pradal) sur les impacts des filets anti-Carpocapse sur le microclimat et les maladies.
13. Co-encadrement en 2011 (25%) avec Luciana Parisi de l'UERI de Gotheron d'un étudiant de MII (Matallah Salim) sur les relations entre architecture du pommier microclimat au sein de la couronne et épidémies de tavelure et d'oïdium.
14. Encadrement en 2010 du stage de 2nd année d'école d'ingénieur, spécialité Génie Physique à PolyTech (Clermont-Ferrand) de France Rouby sur la caractérisation physique de la mouillabilité des feuilles d'espèces fruitières.
15. Co-encadrement en 2010 du stage de fin d'étude (50%) avec Luciana Parisi de l'UERI de Gotheron d'une étudiante ingénieure de l'Institut National d'Horticulture et de Paysage (Emmanuelle Osbert) sur les relations entre architecture du pommier, microclimat au sein de la couronne Angers et épidémies de tavelure.
16. Encadrement en 2010 du stage de fin d'étude d'une étudiante ingénieure (Lanlan Wang) de l'ESA sur relations entre architecture du pommier, microclimat au sein de la couronne et épidémies de tavelure.
17. Co-encadrement (50%) avec Hervé Sinoquet (UMR PIAF) en 2008 d'un stagiaire de MII (Mathieu Dassot) sur la mineuse du pommier.
18. Encadrement (100%) d'un stagiaire de Master I de physique de l'université Blaise Pascal (Z. Abdirahman) en 2007 sur la modélisation de la propagation de la prise en glace dans le tronc d'un arbre.

- CDDs (Post-docs, Ingénieurs) : 5

1. Co-encadrement de juillet 2021 à juillet 2023 de Mr Cyril Bozonnet en qualité de Post-doctorant dans le cadre du projet ANR AcouFollow sur la modélisation des dynamiques de gel/dégel dans les tissus ligneux.
2. Co-encadrement de septembre 2020 à septembre 2022 de Mr Nicolas Dusart en qualité de Post-doctorant dans le cadre d'un financement CPER (Contrat Plan Etat Région) sur l'influence de la variabilité spatiale des températures ligneuses au sein d'un houppier sur la vulnérabilité au froid. Application phénomènes de faux printemps (température chaudes hivernales).
3. Encadrement de janvier 2020 à juillet 2021 de Mr Maurin Woussen en qualité d'ingénieur d'études dans le cadre du projet ANR COOLTREES sur la modélisation des transferts thermo-radiatifs arbres/environnement en milieu urbain.
4. Encadrement de novembre 2018 à novembre 2020 de Mlle Aurélie Grosperrin en tant qu'ingénieur d'études dans le cadre du Livrable 6 du Challenge 1 du projet ISITE Cap 20-25

de Clermont-Ferrand, sur la modélisation de la température des épis de blé dans les systèmes agroforestiers.

5. Encadrement de juillet 2018 à Juin 2019 de Mr Tarik Chakkour en qualité d'ingénieur d'études dans le cadre du projet ANR COOLTREES sur la modélisation des transferts thermo-radiatifs arbres/environnement en milieu urbain.

Missions d'intérêt général

- Membre du CATI Informatisation et Utilisation des Modèles dédiés aux Agro-écosystèmes (IUMA)
- Membre du comité scientifique de la plateforme OpenAlea
- Animateur du groupe de réflexion sur l'agronomie urbaine – Dpt EA – INRA (2015 – 2016)
- Animateur de l'équipe Micro Environnement et Arbre (MEA) de l'UMR PIAF depuis le 1er janvier 2017
- Directeur adjoint de l'UMR PIAF à compter du 04/2022

Diffusion de la culture scientifique et technologique

- Octobre 2015 – Université Blaise Pascal - Participation à un débat organisé par l'Association des Naturalistes d'Auvergne sur la nature et les initiatives citoyennes pour une ville durable.
- Octobre 2015 – Le train du Climat – Tenue du stand INRA du centre INRA Auvergne Rhône-Alpes en gare de Clermont-Ferrand sur « les arbres face au climat »
- Juin 2016 – Tenue du stand de l'équipe MEA de l'UMR PIAF et conférence auprès du grand public lors des Portes Ouvertes de l'INRA sur « Des arbres pour climatiser la ville. Régulation du climat thermique urbain par les arbres »
- 2015 - 2019 - Accueil réguliers de collégiens et lycéens avec présentation des activités de recherche du laboratoire et discussion sur le parcours d'un chercheur.

4. Responsabilités ou participations à des programmes scientifiques nationaux ou internationaux

- **2022 – 2025** : Participation et co-encadrement d'une thèse (début prévu octobre 2022) dans le cadre du projet européen **DIGITAF** piloté par l'UMR ABSys de Montpellier sur la modélisation du microclimat lumineux et le partage de l'eau en agroforesterie.
- **2021 – 2024** : Participation au projet ANR Blanc **TIR4sTREEt** piloté par l'INSA de Strasbourg sur le microclimat thermique urbain et la modélisation du rôle des arbres.
- **2021- 2024**: Participation au projet ANR bilatéral France Autriche **AcouFollow** piloté par l'université de InnsBruck (Autriche) et l'UMR PIAF portant sur les mécanismes de prise en glace et de réparation de l'embolie hivernale.
- **2021 – 2023** : Responsable du work-package microclimat lumineux dans le cadre du projet France AgriMer **RED2D** piloté par le CTIFL de la Morinière (Tours) dans le cadre de l'évaluation de modes de conduite innovants en arboriculture fruitière.
- **2020 – 2023** : Participation au projet ANR Blanc **Hydrauleaks** coordonné par l'UMR PIAF
- **2019 – 2021** : Participation au projet « **Tree Cools Cattle**» piloté par l'UMRH de Clermont-Ferrand et financé par l'Isite Clermont, Challenge 1, Livrable 6, sur la modélisation du confort thermique des moutons sous couverts arborés.
- **2018 – 2021** : Coordinateur du projet ANR **Cooltrees** sur le rôle des arbres sur le climat urbain – ANR Défi 6 sur les villes durables
- **2018 – 2020** : Co-coordinateur du projet « **Tree Cools Wheat** » avec l'UMR GDEC (INRAE - Clermont-Ferrand) et financé par l'Isite Clermont, Challenge 1, Livrable 6, sur la modélisation des températures des épis de blé.
- **2018 – 2020** : Participation au projet de recherche citoyenne « **VitalUrbanTrees »** porté et financé par l'EarthWatch Institute sur les rôles et la santé des arbres urbains. https://ewgis.org/earthwatch-stp/europe/index.html

- **2017 – 2019** : Participation au projet Européen Biodiversa **UrbanMycoServe** piloté par l'université de Leuven (Belgique) sur le rôle des ectomycorhizes sur le fonctionnement et la durabilité des arbres urbains.
- **2016 – 2018** : Responsable du work-package microclimat dans le cadre du projet **DoLar** porté par l'IRSTEA (Nogent-Sur-Vernisson) et financé par Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt sur le déterminisme du rougissement du Pin Laricio
- **2015 – 2016** : Coordinateur du projet « **Photodégradation de pesticides sur couvert arboré – Activité SDP et modélisation** » - Pari Scientifique Dpt EA INRA
- **2015** : Participation au projet **AvENUe** (L'Arbre en ENvironnement Urbain : Modélisation 3D et suivi des échanges radiatifs et d'énergie d'un îlot vert) porté par l'UMR ICUBE (CNRS – Strasbourg), sur financement TOSCA, et portant sur la détermination du rôle joué par la végétation dans la création de conditions microclimatiques en milieu urbain.
- **2012 – 2013** : Participation au projet « **Utilisation de l'imagerie thermique pour le phénotypage** » porté par l'URP3F (INRAE - Lusignan) - Pari Scientifique Dpt EA INRA –
- **2011 – 2015** : Responsable du work-package modélisation du microclimat au sein du projet ANR blanc **MicroClimite** coordonné par l'IRBI (CNRS) de Tours et portant sur le microhabitat thermique des insectes.
- **2011- 2015** : Responsable d'un work-package sur la caractérisation de la réponse architecturale de plants forestiers à la lumière dans le cadre du projet ANR blanc **Tropic** coordonné par l'UMR PIAF et portant sur la thigomorphogénèse des arbres.
- **2011 – 2014** : Participation au projet ANR bilatérale France/Autriche **AcouFreeze** coordonné par l'UMR PIAF et l'Université d'Innsbruck (Autriche) sur le développement d'un système de mesure acoustique de l'embolie hivernale.
- **2011 – 2014** : Participation au projet **Imprebio** piloté par l'IRSTEA (Nogent-sur-vernisson), financé par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et portant sur l'impact de l'intensité des prélèvements forestiers sur la biodiversité.
- **2010 – 2013** : Participation au projet CASDAR **« Associer un niveau d'erreur aux prédictions des modèles mathématiques pour l'agronomie et l'élevage »** coordonné par l'ACTA et portant sur les méthodologies d'estimation du niveau de fiabilité des modèles.
- **2009 – 2013** : Participation au projet **Alt'Carpo** coordonné par l'UR PSH (INRAE - Avignon) et financé par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables sur l'évaluation de l'utilisation de filets anti carpocapse en arboriculture fruitière.
- **2009-2010**: Participation au projet ARC INRA/INRIA **M2A3PC** coordonné par l'UMR SAVE (INRAE – Bordeaux) et l'IMB (CNRS –Bordeaux) portant sur la modélisation de la dynamique des épidémies de maladies fongiques en arboriculture et viticulture.
- **2007 – 2010** : Participation au projet ANR Systerra **GEDUPIC** coordonné par l'UR PSH (INRAE – Avignon) et portant sur une le développement de nouvelles méthodes de lutte contre les bioagresseurs afin de remplacer les molécules de traitement phytosanitaires,

5. Publications

➢ Articles publiés à destination des communautés scientifiques (Revues avec comité de lecture) (* indique les publications cosignées avec un étudiant co-encadré)

MS 1. S. Le Mentec, P. Stella2, G. Najjar, P. Kastendeuch, **M. Saudreau**, J. Ngao, T. Améglio, J. Colin, D. Flick, and E. Personne (2022) Coupling the TEB and Surfatm models for heat flux modelling in urban area: comparison with flux measurements in Strasbourg (France), Frontiers in Environmental Science, Submitted

MS 2. Ngao J., L. Cárdenas, T Améglio, J. Colin, and **M. Saudreau** (2021). "Implications of Urban Land Management on the Cooling Properties of Urban Trees: Citizen Science and Laboratory Analysis." Sustainability 13(24): 13656., https://doi.org/10.3390/su132413656

MS 3. * Leca, A., Rouby, F., **Saudreau, M.,** Lacointe, A. (2020). Apple leaf wettability variability as a function of genotype and apple scab susceptibility, Scientia Horticulturae, 260, DOI: 10.1016/j.scienta.2019.108890

MS 4. * Bournez, E., Landes, T., Najjar, G., Kastendeuch, P., Ngao, J., **Saudreau, M.** (2019) Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3D tree reconstructions. Urban Forestry and

Urban Greening, (38), 1-10. , DOI : 10.1016/j.ufug.2018.10.016

MS 5. Maarten van Geel, Kang Yu, Gerrit Peeters, Kasper van Acker, Miguel Ramos, Cindy Serafim, Pierre Kastendeuch, Georges Najjar, Thierry Ameglio, Jérôme Ngao, **Saudreau M.**, Paula Castro, Olivier Honnay, Ben Somers (2019-11-22). Soil organic matter rather than ectomycorrhizal diversity is related to urban tree health. PLoS ONE, 14 (11), 14 p

MS 6. Woods, H. A., **Saudreau, M.,** Pincebourde, S. (2018). Structure is more important than physiology for estimating intracanopy distributions of leaf temperatures. Ecology and Evolution, 8 (10), 5206-5218. , DOI : 10.1002/ece3.4046

MS 7. Yu, K., Van Geel, M., Ceulemans, T., Geerts, W., Ramos, M. M., Sousa, N., Castro, P. M. L., Kastendeuch, P., Najjar, G., Ameglio, T., Ngao, J., **Saudreau, M**., Honnay, O., Somers, B. (2018). Foliar optical traits indicate that sealed planting conditions negatively affect urban tree health. Ecological Indicators, 95, 895-906. , DOI : https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.047

MS 8. Van Geel, M. , Yu, K. , Ceulemans, T. , Peeters, G. , van Acker, K. , Geerts, W. , Ramos, M. M. , Serafim, C. , Kastendeuch, P. , Najjar, G. , Ameglio, T. , Ngao, J. , **Saudreau, M**. , Waud, M. , Lievens, B. , Castro, P. M. L. , Somers, B. , Honnay, O. (2018) Variation in ectomycorrhizal fungal communities associated with Silver linden (Tilia tomentosa) within and across urban areas , FEMS Microbiology Ecology, 2018, DOI:10.1093/femsec/fiy207

MS 9. Yu, K., Van Geel, M., Ceulemans, T., Geerts, W., Ramos, M. M., Serafim, C., Sousa, N., Castro, P. M. L., Kastendeuch, P., Najjar, G., Ameglio, T., Ngao, J., **Saudreau, M.,** Honnay, O., Somers, B. (2018). Vegetation reflectance spectroscopy for biomonitoring of heavy metal pollution in urban soils. Environmental Pollution, 243, 1912-1922. , DOI : 10.1016/j.envpol.2018.09.053

MS 10.*Tadrist, L., **Saudreau, M.,** Hemon, P., Amandolese, X., Marquier, A., Leclercq, T., de Langre, E. (2018). Foliage motion under wind, from leaf flutter to branch buffeting. Journal of The Royal Society Interface, 15 (142), 9. , DOI : 10.1098/rsif.2018.0010

MS 11.Hu, R., *Bournez, E., Cheng, S., Jiang, H., Nerry, F., Landes, T., **Saudreau, M.,** Kastendeuch, P., Najjar, G., Colin, J., Yan, G. (2018). Estimating the leaf area of an individual tree in urban areas using terrestrial laser scanner and path length distribution model. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 144, 357-368. , DOI : https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.015

MS 12.* **Saudreau, M.,** Ezanic, A., Adam, B., Caillon, R., Walser, P., Pincebourde, S. (2017). Temperature heterogeneity over leaf surfaces: the contribution of the lamina microtopography. Plant, Cell and Environment, 40 (10), 2174-2188. , DOI : 10.1111/pce.13026

MS 13.*Lavergne, F., Richard, C., **Saudreau, M.,** Venisse, J.-S., Fumanal, B., Goupil, P. (2017). Effect of acibenzolar-S-methyl phototransformation on its elicitation activity in tobacco cells. Plant Physiology and Biochemistry, 118, 370-376. , DOI : 10.1016/j.plaphy.2017.07.008

MS 14.Ngao J., Adam B., **Saudreau M.** (2017) Intra-crown spatial variability of leaf temperature and stomatal conductance enhanced by drought in apple tree as assessed by the RATP model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238, 340-354.

MS 15.Gaudio N., Gendre X., **Saudreau M.,** Seigner V. & Balandier P. (2017) Impact of tree canopy on thermal and radiative microclimates in a mixed temperate forest: A new statistical method to analyse hourly temporal dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology,* 237–238, 71-79.

MS 16.*Yang, W.-W., Chen, X.-L., **Saudreau, M**., Zhang, X.-Y., Zhang, M.-R., Liu, H.-K., Costes, E., Han, M.-Y. (2016). Canopy structure and light interception partitioning among shoots estimated from virtual trees: comparison between apple cultivars grown on different interstocks on the Chinese Loess Plateau. *Trees*. DOI : 10.1007/s00468-016-1403-8

MS 17.Charrier, G., Pramsohler, M., Charra-Vaskou, K., **Saudreau, M**., Ameglio, T., Neuner, G., Mayr, S. (2015). Ultrasonic emissions during ice nucleation and propagation in plant xylem. *New Phytologist, 207* (3), 570-578. DOI : 10.1111/nph.13361

MS 18.Charrier, G., Ngao, J., **Saudreau, M**., Ameglio, T. (2015). Effects of environmental factors and management practices on microclimate, winter physiology and frost resistance in trees. *Frontiers in Plant Science, 6*. DOI : 10.3389/fpls.2015.00259

MS 19.*Tadrist, L., Julio, K., **Saudreau, M**., de Langre, E. (2015). Leaf flutter by torsional galloping: Experiments and model. *Journal of Fluids and Structures, 56* (0), 1-10. DOI : 10.1016/j.jfluidstructs.2015.04.001

MS 20.Landes, T., Hayot, C., Najjar, G., Kastendeuch, P., **Saudreau, M.,** Colin, J., Luhahe, R., Guillemin, S. (2014). Modélisation 3D d'arbre pour comprendre le climat urbain. Un projet multidisciplinaire ambitieux. *Revue XYZ, 141* (4ème trimestre), 61-68.

MS 21.*Nordey, T., Lechaudel, M., **Saudreau, M.,** Joas, J., Génard, M. (2014). Model-Assisted Analysis of Spatial and Temporal Variations in Fruit Temperature and Transpiration Highlighting the Role of Fruit Development. *Plos One, 9* (3), e92532. DOI : 10.1371/journal.pone.0092532

MS 22. Pot, G., Coutand, C., Toussaint, E., Le Cam, J.-B., **Saudreau, M**. (2014). A model to simulate the gravitropic response and internal stresses in trees, considering the progressive maturation of wood. *Trees, 28* (4), 1235-1248. DOI : 10.1007/s00468-014-1033-y

MS 23. *Tadrist, L., **Saudreau, M**., de Langre, E. (2014). Wind and gravity mechanical effects on leaf inclination angles. *Journal of Theoretical Biology, 341*, 9-16. DOI : 10.1016/j.jtbi.2013.09.025

MS 24. ***Saudreau, M.,** Pincebourde, S., Dassot, M., Adam, B., Loxdale, H. D., Biron, D. G. (2013). On the canopy structure manipulation to buffer climate change effects on insect herbivore development. *Trees, 27* (1), 239 - 248. DOI : 10.1007/s00468-012-0791-7

MS 25. **M. Saudreau**, A. Marquier, B. Adam and H. Sinoquet, 2011, Modelling fruit-temperature dynamics within apple tree crowns using virtual plants, Annals of Botany, 108(6): 1111-1120

MS 26. *A. Leca, L. Parisi, A. Lacointe, **M. Saudreau**, 2011, Comparison of Penman–Monteith and non-linear energy balance approaches for estimating leaf wetness duration and apple scab infection Agricultural and Forest Meteorology, 151(8): 1158-1162

MS 27. **Saudreau M.,** Marquier A., Adam B., Monney P. and Sinoquet H., 2009, Experimental Study of Fruit Temperature Dynamics within Apple Tree Crowns, Agricultural and Forest Meteorology 149(2): 362-372.

MS 28. Chambelland J, Dassot M, Adam B, Dones N, Balandier P, Marquier A, **Saudreau M**, Sonohat G, Sinoquet H. 2008. A double-digitising method for building 3d virtual trees with non-planar leaves: Application to the morphology and light-capture properties of young beech trees (fagus sylvatica). Functional Plant Biology 35(10): 1059-1069

MS 29. **Saudreau M**, Marquier A, Adam B, Monney P, H. S. 2008. On the relationship between tree architecture, microclimate and fruit temperature within a three crown. Acta Horticulturae 803: 217-224.

MS 30. **Saudreau M**, Sinoquet H, Santin O, Marquier A, Adam B, Longuenesse JJ, Guilioni L, Chelle M. 2007. A 3-d model for simulating the spatial and temporal distribution of temperature within ellipsoidal fruit. Agricultural and Forest Meteorology, vol 147, 1–15.

MS 31. **Saudreau M.,** Charnay G, Borée J., 2005, Strong Baroclinic Effects in a Light Jet in a Pulsed Coflow, AIAA journal, Vol 43(7), pp 1567-1573

MS 32. **Saudreau M.,** Bury Y., Charnay G, Borée J., 2004, Round Turbulent Air Jet Submitted to a Pulsed Coflow, AIAA journal, Vol 42(2), pp 280-288

➢ Communications dans des congrès et colloques

– Communications avec actes

MS 33. [Présentation orale] Nicolas Dusart, Félix Hartmann, **M. Saudreau**, Bruno Moulia, Guillaume Charrier. Feedback of intracrown temperature heterogeneity on vulnerability to frost (2021) 12th INTERNATIONAL PLANT COLD HARDINESS SEMINAR, IPCHS, Dec 2021, Gather, Japan. pp.31. ⟨hal-03541135⟩

MS 34. [Présentation orale] Marc Voltz, Carole Bedos, David Crevoisier, Cécile Dagès, Meriem Djouhri, et al. (2021) Modélisation intégrée du devenir des pesticides dans le paysage. Colloque SEFA 2021, Jun 2021, Versailles, France. ⟨hal-03303236⟩

MS 35. [Présentation orale] Lucie Poulet, Antoine Vernay, David Duchez, **M. Saudreau**, Helia Sharif, et al. (2019-10-20) A multidisciplinary modeling approach of plant gas exchange in reduced gravity environments. 35th Annual Meeting of the American Society for Gravitational and Space Research, Nov 2019, Denver, United States. ⟨hal-03324836⟩

MS 36. [Présentation orale] Marc Voltz, Carole Bedos, David Crevoisier, Jean-Christophe Fabre, Benjamin Loubet, et al. (2019) Modélisation Intégrée du devenir des Pesticides dans les Paysages agricoles (projet MIPP). 49e Congrès Groupe Français de recherche sur les Pesticides, May 2019, Montpellier, France. ⟨hal-02962223⟩

MS 37. [Présentation orale] Thierry Ameglio, Lia Lamacque, Romain Baffoin, Stéphane Herbette, María Elena Fernández, et al. (2019) Continuous stem diameter variations as an innovative phenotyping tools for tree functioning under stress. International Conference TOPWOOD + LIA Forestia Adapting forest ecosystems and wood products to biotic and abiotic stress, Mar 2019, Bariloche, Argentina. ⟨hal-03372508⟩

MS 38. [Présentation orale] Elena Bournez, T. Landes, P. Kastendeuch, G. Najjar, **M. Saudreau** J. Colin, J. Ngao (2018-08-08) Simulation of urban vegetation impact based on the microclimate model LASER/F: the case study of a park in Strasbourg Presented at : International Conference on Urban Climate (ICUC 10), New-York, USA

MS 39. [Présentation orale] Wafa Ben Othman, Noemie Gaudio, Marie Launay, Patrice Lecharpentier, Dominique Ripoche, Sébastien Saint-Jean, **Marc Saudreau** (2017-10-17). Évaluation et amélioration du module microclimatique de STICS. Presented at : 11. Séminaire des utilisateurs de Stics, La Rochelle, fr (2017-10-17 - 2017-10-19), https://hal.inrae.fr/hal-02788537

MS 40. [Présentation orale] Bournez E., Landes T., Saudreau M., Kastendeuch P. & Najjar G. (2017) From TLS point clouds to 3D models of trees: a comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W3, 113-120.

MS 41. Christophe Schwartz, Béatrice Bechet, Christine Aubry, Jean-Pierre Renou, Jean-Pierre Rossi, F. Segur, Laure Vidal Beaudet, **M. Saudreau** (2017) Quand agricultures urbaines cherchent agronomie urbaine. International congress Sustainable Urban Agricultures: Vector for the ecological transition, Jun 2017, TOULOUSE, France. pp.Session 1. ⟨hal-02512523⟩

MS 42. [Présentation orale] Pincebourde, S., **Saudreau, M.,** Caillon, R., Ezanic, A. (2016). The thermal heterogeneity at leaf, canopy and biogeographical scales: consequences for leaf dwelling insects. *Integrative and Comparative Biology, 56*. Presented at Annual Meeting of the Society-for-Integrative-and-Comparative-Biology (SICB), Portland, USA (2016-01-03 - 2016-01-07). Cary, USA: Oxford Univ. Press Inc.

MS 43. [Poster] Bournez E., Landes T., **Saudreau M.,** Kastendeuch P. & Najjar G. (2016) Impact of level of details in the 3d reconstruction of trees for microclimate modeling. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B8, 257-264.

MS 44. [Présentation orale] **Saudreau, M**. (Présentateur), Kastendeuch, P., Ngao, J., Najjar, G., Ameglio, T. (2016). . Arbre au service du climat urbain : comment lutter contre les ilots de chaleur. In: *Rencontres Nationales d'Arboriculture 2016* (p. 1 p.). Presented at Rencontres Nationales d'Arboriculture, Vichy, FRA (2016-06-24 - 2016-06-24).

MS 45. [Poster] Ngao, J., Marquier, A., Saint Joanis, B., Vandame, M., Walser, P., **Saudreau, M**., Lacointe, A. (2016). Source - sink relationships in young apples (Malus pumila Mill.) impacted by nitrogen fertilization. In: FSPMA 2016 (p. A0). Presented at 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), Qingdao, CHN (2016-11-07 - 2016-11-11). Qingdao, CHN : FSPMA 2016. 1 p.

MS 46. [Poster] Bournez, E., Landes, T., Najjar, G., Ngao, J., **Saudreau, M.** (2016). From lidar acquisition to FSPM application to 3D urban tree transpiration modeling. In: FSPMA 2016 (p. A0). Presented at 2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), Qingdao, CHN (2016-11-07 - 2016-11-11). Qingdao, CHN : FSPMA 2016. 1 p.

MS 47. [Poster] Reyes, F., Pallas, B., Pradal, C., Zanotelli, D., Boudon, F., Vaggi, F., **Saudreau, M.,** Tagliavini, M., Gianelle, D., Costes, E. (2016). Exploring carbon allocation with a multi-scale model: the case of apple. Presented at International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA 2016), Qingdao, CHN (2016-11-07 - 2016-11-11).

MS 48. [Présentation orale] Charrier, G., Charra-Vaskou, K., Kasuga, J., **Saudreau, M.**, Cochard, H., Proust, A., Ameglio, T., Mayr, S. (2015). . Ultrasonic acoustic emissions: freezing pattern and relation with cavitation and freeze-thaw induced embolism in woody species. In: *Xylem International Meeting* (p. T21). Presented at Xylem International Meeting, Bordeaux, FRA (2015-09-07 - 2015-09-09). Bordeaux, FRA : INRA - Université de Bordeaux.

MS 49. [Full paper] Najjar, G., Colin, J., Kastendeuch, P., Ngao, J., **Saudreau, M.,** Landes, T., Ameglio, T., Luhahe, R., Guillemin, S. (2015). *A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of the city of Strasbourg, France*. Presented at ICUC9 - 9 th International Conference on Urban Climate, Toulouse, FRA (2015-07-20 - 2015-07-24). INT : International Association for Urban Climate.

MS 50. [Full paper] Ngao, J., Colin, J., Ameglio, T., **Saudreau, M.,** Kastendeuch, P., Granier, A., Najjar, G. (2015). *Temporal variations of transpiration and latent heat fluxes from isolated linden crowns and lawns in a park at Strasbourg, France*. Presented at ICUC9 - 9 th International Conference on Urban Climate, Toulouse, FRA (2015-07-20 - 2015-07-24). INT : International Association for Urban Climate.

MS 51. [Présentation orale] Pallas, B., Ngao, J**., Saudreau, M**., Costes, E. (2015). *Combining 3D digitizing data and architectural modelling to simulate shoot growth and geometry in apple.*. Presented at X International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management, Montpellier, FRA (2015-06-02 - 2015-06-05).

MS 52. [Présentation orale] Yang, W., Chen, X., **Saudreau, M**., Zhang, M., Gao, C., Liu, H., Costes, E., Hang, M. (2015). *Light interception characteristics estimated from three-dimensional virtual plants for two apple cultivas and influenced by combinations of rootstocks and tree architecture in loess plateau of China*. Presented at X. International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management, Montpellier, FRA (2015-06-02 - 2015-06-05).

MS 53. [Présentation orale] Tadrist, L., **Saudreau, M.,** De Langre, E. (2014). Modeling wind effect on the motion of leaves in a tree: from single leaf mechanics to global quantities. Presented at IUFRO 2014 Wind and Trees International Conference, São Paulo, BRA (2014-08-03 - 2014-08-08).

MS 54.[Poster] Lofe, M.-P., **Saudreau, M.,** Guyot, S., Biron, D. G. (2014). *Effet de l'infection par la microsporidie Nosema Ceranae sur la régulation de la température par l'abeille domestique*. Presented at 2ème Journées de la recherche apicole, Paris, FRA (2014-02-05 - 2014-02-06). Paris, FRA : ITSAP.

MS 55.[Poster] **Saudreau, M.,** Adam, B., Pincebourde, S. (2014). . Modelling spatial and temporal leaf temperature dynamics at leaf and canopy scales. In: *The response of organisms to climate change in heterogeneous environments*. Presented at Workshop HETEROCLIM, Loches, FRA (2014-06-10 - 2014-06-14). Tours, FRA : IRBI - LEGS.

MS 56.[Présentation orale] Ngao, J., Adam, B., Charreyron, M., **Saudreau, M**. (2013). *Spatial and temporal variability of leaf gas exchange and temperature responses of apple trees to drought assessed by a 3D turbid medium model*. Presented at 7. International Conference on Functional-Structural Plant Models, Sariselka , FIN (2013-06-09 - 2013-06-14). FSPM 2013.

MS 57.[Poster] **Saudreau, M.,** Adam, B., Ezanic, A., Pincebourde, S. (2013). *Modelling spatial and temporal leaf temperature dynamics a focus on the leaf boundary layer*. Presented at 7. International Conference on Functional-Structural Plant Models, Sariselka, FIN (2013-06-09 - 2013-06-14). FSPM 2013.

MS 58.[Full paper] Tadrist, L., de Langre, E., **Saudreau, M.** (2013). *How petiole flexibility changes light interception at the tree scale*. Presented at 7. International Conference on Functional-Structural Plant Models, Sariselka, FIN (2013-06-09 - 2013-06-14). FSPM 2013.

MS 59.[Abstract] Chelle, M., Pincebourde, S., Sache, I., **Saudreau, M.,** Saint Jean, S., Bussière, F., Huber, L., Bernard, F., Leca, A., Caillon, R., Gigot, C. (2012). . Climate and plant pest dynamics: scales matter. In: *Effects of plant and canopy architecture on microclimatic variables and epidemiological processes*. Presented at Plant and canopy architecture impact on disease epidemiology and est development international conference, Rennes, FRA (2012-07-01 - 2012-07-05).

MS 60.[Poster] **Saudreau, M.,** Adam, B., Dones, N., Ploquin, S., Moulia, B. (2012). . The 3D magnetic digitizing: a tool to measure 3D tree structure and its dynamics. *Plant Biomechanics International Conference*. Presented at 7th Plant Biomechanics International Conference, Clermont-Ferrand, FRA (2012-08-20 - 2012-08-24). Clermont-Ferrand, France : INRA - UMR PIAF.

MS 61.[Poster] Tadrist, L., **Saudreau, M.,** De Langre, E. (2012). The role of elastic deformation in the statics of inclination angle of leaves. *Plant Biomechanics International Conference*. Presented at 7th Plant Biomechanics International Conference, Clermont-Ferrand, FRA (2012-08-20 - 2012-08-24). Clermont-Ferrand, FRA : INRA - UMR PIAF.

MS 62.[Présentation orale] **M. Saudreau**, André Marquier, Boris Adam, Patrick Monney, Hervé Sinoquet. On the relationship between tree architecture, microclimate and fruit temperature within a three crown. 8. International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management, 2007, Waedenswil, Switzerland. pp.217-224. ⟨hal-00964837⟩

MS 63.[Poster] Ana Xavier Scomparin, **M. Saudreau**, Hervé Sinoquet, Benoit Sauphanor, O. Fernandes, et al. (2008) Effects of thermoperiodic conditions on the developmental rate of codling moth larvae of resistant and non-resistant strains to chemical and viral (CpGv) insecticides. 7. International Conference on Integrated Fruit Production, Oct 2008, Avignon, France. 1 p. ⟨hal-00964836⟩

MS 64.[Présentation orale] J.C. Chambelland, Boris Adam, Nicolas Donès, Philippe Balandier, André Marquier, et al. (2007) Automatic instantiation of a structural leaf model from 3D scanner data: application to light interception computation. 5th International workshop on functional-structural plant model, Napier, NZL, 4-9 November 2007, pp.P6/1 ⟨hal-02589662⟩

MS 65.[Présentation orale] Jean-Christophe Chambelland, Mathieu Dassot, Boris Adam, Nicolas Dones, Philippe Balandier, et al. (2007) A double-digitising method for building 3D virtual trees with non-planar leaves: application to the morphology and light-capture properties of young beech trees (Fagus sylvatica). 5. International Workshop on Functional Structural Plant Models, Nov 2007, Napier, New Zealand. ⟨10.1071/FP08051⟩. ⟨hal-00964598⟩

- **Communications sans actes**

MS 66.[Présentation orale] Desarmes C., **Saudreau M.**, Marquier A., Ginane C., Bernard M. (2021-06) Bien-être animal et dynamique de l'ombrage généré par une strate arborée d'une parcelle agroforestière. Analyse de simulations sous la plateforme Capsis. FOREM Meeting, 15 juin 2021, Webinaire.

MS 67.[Présentation orale] **Saudreau M.,** T. Améglio, J. Ngao, J. Colin, T. Landes, P. Kastendeuch, G. Najjar, P. Laille, S. Leroux, C. Bastianelli (2021-05) Projet COOLTREES, le rafraîchissement des villes par les arbres – Quantification et modélisation. Colloque « Arbre, Bois, Forêt et Société », ANR, webinaire. https://www.youtube.com/watch?v=AvO9exJpFus&list=PLBGAVVGzrPkFPHvneCXwsVFU9ex-w_gTf&index=3

MS 68. [Article de journal / Web] Frédéric Ségur, **M. Saudreau**, Depecker Caroline (2020-10) Pour profiter de la fraîcheur des arbres : les aider à s'adapter au climat. https://popsciences.universite-lyon.fr/ressources/garder-le-pouvoir-rafraichissant-des-forets-les-aider-a-sadapter-au-climat/, Pop'Sciences (ISSN : 2680-5987)

MS 69. [Présentation orale] **Saudreau M.,** T. Améglio, J. Ngao, J. Colin, C. Finzinger, M. Cárdenas, S. Loiselle, D. Parramon-Dhawan, C. Narraway, B. Pudifoot, P. Lernelius, K. Delfau (2020). L'Arbre en Milieu Urbain - Projet de recherche en France sur les infrastructures vertes, solutions durables. Retour sur le Programme Earthwatch « Sutainable Cities », HSBC France Paris.

MS 70. [Article de journal / Web] Marc Saudreau (2020-06-23). L'arbre urbain se coule dans le modèle climatique Cooltrees. , https://www.lemoniteur.fr/article/l-arbre-urbain-se-coule-dans-le-modele-climatique-cooltrees.2094936, Le Moniteur

MS 71. [Article de journal / Web] Marc Saudreau (2019). Arbres et ville : l'enjeu de la température. , https://hal.inrae.fr/hal-02788234

MS 72. [Article de journal / Web] Marc Saudreau (2019-06-27). Pour avoir moins chaud en ville, une solution : plus d'arbres et de végétation ! https://www.lamontagne.fr/clermont-ferrand-63000/actualites/pour-avoir-moins-chaud-en-ville-une-solution-plus-d-arbres-et-de-vegetation_13593637/, Paru dans La Montagne

MS 73. [Présentation orale] **Marc Saudreau**, Thierry Ameglio, Jérome Ngao (2019-10-17). Les arbres et les ilôts de chaleur urbains. 23 p., Presented at : Journée Technique Echospaysage "Arbres et Sécurité, de la santé des citadins à la gestion des risques de rupture", Lempdes, fr, (2019-10-17 - 2019-10-17), https://hal.inrae.fr/hal-02394665

MS 74. [Présentation orale] Thierry Ameglio, Jérome Ngao, **Marc Saudreau** (2019-10-03). Atténuer les Ilots de Chaleur Urbains : un service de l'arbre. Presented at : L'arbre urbain, Aix-en-Provence, fr (2019-10-03 - 2019-10-03), https://hal.inrae.fr/hal-02310108

MS 75. [Communication dans un congrès - Présentation orale] Thierry Ameglio, Jérome Ngao, **Marc Saudreau** (2018-02-07). Le rafraichissement des villes par les arbres : Quantification et modélisation de l'apport des arbres sur le confort thermique des villes. 18 p., Presented at : Colloque AFB-CNFPT : Biodiversité et Collectivités Territoriales : Quelles opportunités pour les territoires ?, Montpellier, fr, (2018-02-07 - 2018-02-08), https://hal.inrae.fr/hal-01730006

MS 76. [Présentation orale] Jérome Ngao, Thierry Ameglio, **Marc Saudreau** (2019-11-18). Variations de diamètres des arbres, un outil innovant pour caractériser la phénologie ??? - Un cas d'étude d'arbres en ville.... Presented at : Ecole Thématique FP INRA -InnObs, Montpellier, fr (2019-11-18 - 2019-11-18), https://hal.inrae.fr/hal-02444447

MS 77. [Poster] **M. Saudreau**, André Marquier, Pascal Walser, Grosperrin Aurélie, Cécile Ginane, et al. Arbres et confort thermique des cultures et des ruminants. Croisons les regards #4 - Journée d'échanges du RMT AgroforesterieS, Sep 2019, Paris, France. ⟨hal-03547598⟩

MS 78. [Présentation orale] Mascarena L. Cardenas, Thierry Ameglio, **Marc Saudreau**, Jérome Ngao, Daphne Parramon-Dhawan, Steven Loiselle (2019-06-04). Interdisciplinary citizen science on urban green ingrastructure for building sustainable cities. Presented at : The Nature of Cities 2019, Paris, fr (2019-06-04 - 2019-06-07), https://hal.inrae.fr/hal-02154674

MS 79. [Présentation orale] Macarena L. Cardenas, Thierry Ameglio, **Marc Saudreau**, Jérome Ngao, Daphne Parramon-Dhawan, Steven Loiselle (2019-06-04). Higher sustainability thanks to better afforestation of Cities (HSBC). Presented at : TNOC 2019, Paris, fr (2019-06-04 - 2019-06-07), https://hal.inrae.fr/hal-02154675

MS 80. [Présentation orale] Ameglio, T., Ngao, J., **Saudreau, M**. (2018). Le rafraichissement des villes par les arbres : Quantification et modélisation de l'apport des arbres sur le confort thermique des villes. Presented at Colloque AFB-CNFPT : Biodiversité et Collectivités Territoriales : Quelles opportunités pour les territoires ?, Montpellier, FRA (2018-02-07 - 2018-02-08). 18 p.

MS 81. [Présentation orale] Ben Othman , W., Gaudio, N., Launay, M., Lecharpentier, P., Ripoche, D., Saint-Jean, S., **Saudreau, M**. (2017). Évaluation et amélioration du module microclimatique de STICS. Presented at 11. Séminaire des utilisateurs de Stics, La Rochelle, FRA (2017-10-17 - 2017-10-19). 25 p.

MS 82. [Présentation orale] Voltz, M., Bedos, C., Fabre, J.-C., Loubet, B. (Présentateur), Chataignier, M., Bankwal, P., Barriuso, E., Benoit, P., Brunet, Y., Casellas, E., Chabrier, P., Chambon, C., Crevoisier, D., Dagès, C., Douzals, J.-P., Drouet, J.-L., Lafolie, F., Mamy, L., Moitrier, N., Personne, E., Pot-Genty, V., Raynal, H., Ruelle , B., Samouelian, A., **Saudreau, M.** (2017). Modélisation intégrée du devenir des pesticides. In: Colloque

Modélisation de paysages agricoles pour la simulation et l'analyse de processus. Presented at INRA réseau interdisciplinaire PAYOTE, Paris, FRA (2017-10-04 - 2017-10-05).

MS 83. [Présentation orale] Christophe Schwartz, Béatrice Bechet, Christine Aubry, Jean-Pierre Renou, Jean-Pierre Rossi, F. Segur, Laure Vidal Beaudet, **Marc Saudreau** (2017-06-06). Quand agricultures urbaines cherchent agronomie urbaine. Session 1, Presented at : International congress Sustainable Urban Agricultures: Vector for the ecological transition, TOULOUSE, fr, (2017-06-06 - 2017-06-09), https://hal.inrae.fr/hal-02512523

MS 84. [Présentation orale] **Marc Saudreau**, Pierre Kastendeuch, Jérome Ngao, Georges Najjar, Thierry Ameglio (2016-06-24). Arbre au service du climat urbain : comment lutter contre les ilots de chaleur. 10 p., Presented at : Rencontres Nationales d'Arboriculture, Vichy, fr, (2016-06-24 - 2016-06-24), https://hal.inrae.fr/hal-02739764

MS 85. [Poster] **Saudreau, M**., Ameglio, T., Ngao, J. (2016). *Des arbres pour climatiser la ville. Régulation du climat thermique urbain par les arbres.*. Presented at Journées Portes Ouvertes INRA Crouel, Clermont-Fd, FRA (2016-06-02 - 2016-06-05).

MS 86. [Présentation orale] Ngao, J., Colin, J., Ameglio, T., **Saudreau, M**., Kastendeutsch, P., Granier, A., Najjar, G. (2015). *Temporal variation of transpiration and latent heat fluxes from isolated linden crowns and lawns in a park at Strasbourg, France*. Presented at ICUC9, Toulouse, FRA (2015-07-20 - 2015-07-24).

MS 87. [Présentation orale] Alaphilippe, A., Capowiez, Y., Severac, G., Simon, S., **Saudreau, M.,** Siegwart, M., Stefano, C., Stefano, V. (2014). *Codling moth exclusion netting: an overview of French and Italian experiences*. Presented at IOBC-WPRS Working Group "Integrated Plant Protection in Fruit Crops", Viennes, AUT (2014-10-06 - 2014-10-09).

MS 88. [Poster] Wang, S., Charbouillot, T., Goupil, P., **Saudreau, M.,** Richard, C. (2014). *Effect of solar light on the fate of elicitor acibenzolar-S-methyl, during the use phase of its life cycle*. Presented at Congrès Biocontrol2014, Perpignan, FRA (2014-09-24 - 2014-09-26)

MS 89. [Présentation orale] Leca, A., **Saudreau, M.,** Parisi, L., Gros, C., Lacointe, A. (2012). *Spatial variability of wetness duration within a tree-crown*. Presented at International Conference "Plant and Canopy Architecture Impact on Disease Epidemiology and Pest Development, Rennes, FRA (2012-07-01 - 2012-07-05).

MS 90. [Poster] Amidou Traore, David Georges Biron, Fanette Chevallier, Boris Adam, **M. Saudreau**, et al. (2010) Imaging and analysis of an apple pest behaviour:MRI and X-ray microtomography comparison. MR In Food, Sep 2010, Clermont-Ferrand, France. 2 p. ⟨hal-00964167⟩

MS 91. [Présentation orale] **M. Saudreau**, Mathieu Dassot, Boris Adam, Sylvain Pincebourde, . A biophysical approach to simulate effects of climatic change on tree pest insects.. Interdisciplinarity workshop on Adapting to Climate Change Agriculture and Ecosystems, Oct 2010, Aubière, France. ⟨hal-01189808⟩

MS 92. [Présentation orale] Boris Adam, David Georges Biron, Nicolas Dones, Alexandre Leca, **M. Saudreau**, et al. (2008) Simulating microclimates in orchards, a promising prospect to reduce pest and pathogen damages and chemical treatments. First Congress of the Federation for Environmental Research, 2008, Clermont-Ferrand, France. pp.24. ⟨hal-00964473⟩

MS 93. [Présentation orale] **Saudreau M.**, B. Adam, B., et al. (2006). Dynamiques thermiques hivernales au sein d'un arbre isolé. Groupe d'Etude de l'Arbre, Montpellier, France.

➢ Rapport de fin de contrat

MS 94. Sandrine Perret, Océane Audin, Dominique Balay, Michel Chartier, Camille Couteau, et al. (2019) Adaptation de la sylviculture du pin laricio en France dans le contexte de la maladie des bandes rouges : Quels sont les déterminants de la vulnérabilité du pin laricio à la maladie des bandes rouges ? Rapport final. [Rapport de recherche] Irstea Nogent sur Vernisson; CNPF; DSF; IGN; INRA; ONF. 2019, pp.144. ⟨hal-03336070⟩

MS 95. Capowiez, Y., Severac, G., Sagnes, J.-L., Alaphilippe, A., Cros, C., Parisi, L., Simon, S., **Saudreau, M**., Franck, P., Lavigne, C., Plénet, D., Siegwart, M., Angevin, F., Mazzi, C., Rault, M. (2013). *Impacts agronomiques et environnementaux d'une méthode de lutte permettant de reduire fortement l'usage des pesticides : les filets ALt-Carpo en arboriculture*.

MS 96. **M. Saudreau**, Hervé Cochard (2008) Contribution à l'étude de l'influence des changements climatiques dans la modulation des résistances aux stress biotique et abiotique de fruitiers tempérés. [Contrat] Institut National de la Recherche Agronomique., 8 p. ⟨hal-01189805⟩

MS 97.M. Chelle, B. Adam, T. Améglio ,M. Bonhomme, H. Cochard, A. Marquier ,**M. Saudreau** ,H. Sinoquet ,L. Guilioni , J. Lecoeur, H. Gautier, M. Génard, JJ Longuenesse (2006) Modélisation de la distribution 3d de la température au sein d'organes végétaux, Projet Innovant 2004 – 2005.

➢ Applications Logiciels

MS 98.Maurin W, Kastendeuch, P., Saudreau, M. (2021). LASER.T, https://www6.inrae.fr/cooltrees

MS 99.Adam, B., Sinoquet, H., **Saudreau, M.** (2014). *VegeMaker,* http://prodinra.inra.fr/record/265661

MS 100. Adam, B., Ngao, J., Sinoquet, H., **Saudreau,** M. (2013). *pyRATP*, http://prodinra.inra.fr/record/265670

➢ Articles dans des revues à visées professionnelles ou techniques

MS 101. **Saudreau M**. Leca A., P Cruiziat (2019), L'eau aux interfaces : Phénomènes capillaires, E-Book La vigie de l'eau, https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/outils-et-concepts-de-base/15-l-eau-aux-interfaces-phenomenes-capillaires

MS 102. **Saudreau, M.,** Kastendeuch, P., Ngao, J., Najjar, G., Ameglio, T. (2015). . Régulation du climat thermique urbain par les arbres : ombrage et température du couvert. *Innovations Agronomiques, 45*, 23-34.http://prodinra.inra.fr/record/349732

➢ Articles de vulgarisation

MS 103. L.Triollet, P. Laïlle, **M. Saudreau** (2021) Le rafraîchissement des villes par les arbres, Les résultats du programme de recherche ANR COOLTREES, une fenêtre ouverte vers l'aménagement des villes de demain, 46 p.

MS 104. Leca, A., **Saudreau, M.** (2010). Modélisation physique de la durée d'humectation à l'échelle de la feuille tenant compte de la mouillabilité de la feuille. Auvergne Sciences, 122020, 2 p.https://prodinra.inra.fr/record/45206

➢ Chapitres d'ouvrage

MS 105. Laurent Brun, Luciana Parisi, Sylvain Pincebourde, **M. Saudreau** (2022), L'anticipation des impacts du changement climatique sur les bioagresseurs en arboriculture fruitière. Éditions Quae. Les productions fruitières à l'heure du changement climatique, pp.464, Février 2022

➢ Rapports à destination des professionnels ou des pouvoirs publics

MS 106. Marquier, A., Saudreau, M. (2018). Caractérisation de l'éclairement du sentier pédagogique forestier du Mont-Dore (63). Clermont-Ferrand, FRA : PIAF, INRA UMR

MS 107. Marquier, A., Saudreau, M. (2013). Caractérisation de l'éclairement du sentier pédagogique forestier de Royat (63). Clermont-Ferrand, FRA : PIAF, INRA UMR.

References

1. Johnson, I.R. and J.H.M. Thornley, *Temperature Dependence of Plant and Crop Process.* Annals of Botany, 1985. **55**(1): p. 1-24.
2. Vesque, J., *De l'influence de la température du sol sur l'absorption de l'eau par les racines.* .Annales des Sciences naturelles, Botanique, 1878. **Série 6**: p. 169-222.
3. Curtis, O.F. and C. C.K., *The relative effectiveness of the temperature of the crown as contrasted with that of the rest of the plant upon flowering of celery plants.* American Journal of Botany, 1930. **17**: p. 1047-1048.
4. Peterson, M.E., et al., *The dependence of enzyme activity on temperature: determination and validation of parameters.* The Biochemical journal, 2007. **402**(2): p. 331-337.
5. Ritchie, J.T. and D.S. NeSmith, *Temperature and crop development,* in *Modeling plant and soil systems.* 1991. p. 5-29.
6. Damour, G., et al., *An overview of models of stomatal conductance at the leaf level.* Plant Cell and Environment, 2010. **33**(9): p. 1419-1438.
7. Durand R., Bonhomme R., and D. M., *Seuil optimal des sommes de températures Application au maïs (Zea mays L.).* Agronomie, 1982. **2**(7): p. 589-597.
8. Kearney, M. and W. Porter, *Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges.* Ecology Letters, 2009. **12**(4): p. 334-350.
9. Bernard, F., et al., *The development of a foliar fungal pathogen does react to leaf temperature!* New Phytologist, 2013. **198**(1): p. 232-240.
10. Sharpe, P.J. and D.W. DeMichele, *Reaction kinetics of poikilotherm development.* J. theor. Biol, 1977. **64**: p. 649-670.
11. Berthet, P., *Les plantes et le froid [article]*. Publications de la Société Linnéenne de Lyon, 2000. **69-1**: p. 4-6.
12. Monteith, J.L. and M.H. Unsworth, eds. *Principles of environmental physics*. 1990, Edward Arnold: London. 291 pp.
13. Levitt, J., *Physiological Ecology: A Series of Monographs, Texts, and Treatises,* in *Chilling, Freezing, and High Temperature Stresses (Second Edition)*, J. Levitt, Editor. 1980, Academic Press. p. ii.
14. IPCC, *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2021.
15. Bebber, D.P., M.A.T. Ramotowski, and S.J. Gurr, *Crop pests and pathogens move polewards in a warming world.* Nature Climate Change, 2013. **3**(11): p. 985-988.
16. Morin, X., D. Viner, and I. Chuine, *Tree species range shifts at a continental scale: new predictive insights from a process-based model.* Journal of Ecology, 2008. **96**(4): p. 784-794.
17. Leuzinger, S. and C. Körner, *Tree species diversity affects canopy leaf temperatures in a mature temperate forest.* Agricultural and Forest Meteorology, 2007. **146**(1): p. 29-37.
18. Leigh, A., et al., *The influence of leaf size and shape on leaf thermal dynamics: does theory hold up under natural conditions?* Plant Cell and Environment, 2017. **40**(2): p. 237-248.
19. Potter, K.A., H. Arthur Woods, and S. Pincebourde, *Microclimatic challenges in global change biology.* Global Change Biology, 2013. **19**(10): p. 2932-2939.
20. Piskolczi, M., C. Varga, and J. Racsko, *A review of the meteorological causes of sunburn injury on the surface of apple fruit (Malus domestica Borkh).* Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, 2004. **12**(Special issue): p. 245-252.
21. Litzow M. and P. H., *Materials for potential use in sunscald prevention.* Journal of Arboriculture, 1983. **9**(2): p. 35-38.
22. Améglio, T., et al., *Winter embolism, mechanisms of xylem hydraulic conductivity recovery and springtime growth patterns in walnut and peach trees.* Tree Physiology, 2002. **22**(17): p. 1211-1220.
23. Lescourret, F., O. Inizan, and M. Génard, *Analyse de l'étalement temporel de la floraison et influence de la variabilité intra-arbre de la chute et de la croissance précoce des pêches.* Canadian Journal of Plant Science, 2000. **80**: p. 129-136.
24. Tomes, M.L., *Temperature inhibition of carotene synthesis in tomato.* Botanical Gazette, 1963. **11**: p. 180-185.
25. Allen, C.D., et al., *A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests.* Forest Ecology and Management, 2010. **259**(4): p. p. 660 - p. 684.
26. Jamieson, P.D., et al., *Prediction of Leaf Appearance in Wheat - a Question of Temperature.* Field Crops Research, 1995. **41**(1): p. 35-44.
27. Connor, E.F. and M.P. Taverner, *The Evolution and Adaptive Significance of the Leaf-Mining Habit.* Oikos, 1997. **79**(1): p. 6-25.

28. Vallavieille-Pope, C.d., et al., *Comparative effect of temperature and interrupted wet periods on germination, penetration, and infection of Puccinia recondita f. sp. tritici and P. striiformis on wheat seedlings.* Phytopathology, 1995. **85**: p. 409-415.
29. Martin, T.A., et al., *Boundary layer conductance, leaf temperature and transpiration of Abies amabilis branches.* Tree Physiology, 1999. **19**(7): p. 435-443.
30. Leuzinger, S., R. Vogt, and C. Körner, *Tree surface temperature in an urban environment.* Agricultural and Forest Meteorology, 2010. **150**(1): p. 56-62.
31. Génard, M. and C. Bruchou, *Multivariate analysis of within-tree factors accounting for the variation of peach fruit quality.* Scientia Horticulturae, 1992. **52**: p. 37-51.
32. Lakso, A.N., *Correlations of fisheye photography to canopy structure, light climate, and biological responses to light in apple trees.* Journal of the american Society for horticultural Sciences, 1980. **105**: p. 43-46.
33. Körner, C. and E. Hiltbrunner, *The 90 ways to describe plant temperature.* Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 2018. **30**: p. 16-21.
34. Mullaney, J., T. Lucke, and S.J. Trueman, *A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments.* Landscape and Urban Planning, 2015. **134**: p. 157-166.
35. Pangga, I.B., J. Hanan, and S. Chakraborty, *Pathogen dynamics in a crop canopy and their evolution under changing climate.* Plant Pathology, 2011. **60**(1): p. 70-81.
36. Altieri, M.A., et al., *Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems.* Agronomy for Sustainable Development, 2015. **35**(3): p. 869-890.
37. Pope, S.B., *Turbulent Flows*. 2000, Cambridge: Cambridge University Press.
38. Schuepp, P.H., *Tansley review N°59 Leaf boundary-layers.* New Phytologist, 1993. **125**(3): p. 477-507.
39. Gastellu-Etchegorry, J.-P., et al., *Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART 5) for Modeling Airborne and Satellite Spectroradiometer and LIDAR Acquisitions of Natural and Urban Landscapes.* Remote Sensing, 2015. **7**(2): p. 1667-1701.
40. Kastendeuch, P.P. and G. Najjar, *Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas.* Solar Energy, 2009. **83**(3): p. 333-341.
41. Jacquemoud, S. and F. Baret, *PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra.* Remote Sensing of Environment, 1990. **34**(2): p. 75-91.
42. Ozisik, M.N., *Radiative transfer and interactions with conduction and convection / M. Necati Ozisik*. 1973, New York: Wiley.
43. Cochard H., *A new mechanism for tree mortality due to drought and heatwaves*. 2020, Peer Community In. p. 17 p.
44. Gibert, C., et al., *Modelling the effect of fruit growth on surface conductance to water vapour diffusion.* Annals of Botany, 2005. **95**(4): p. 673-683.
45. Linacre, E., *Further notes on a feature of leaf and air temperatures.* Theoretical and Applied Climatology, 1967. **15**(4): p. 422-436.
46. Chelle, M., *Phylloclimate or the climate perceived by individual plant organs: What is it? How to model it? What for?* New Phytologist, 2005. **166**(3): p. 781-790.
47. Helliker, B.R. and S.L. Richter, *Subtropical to boreal convergence of tree-leaf temperatures.* Nature, 2008. **454**(7203): p. 511-514.
48. Aldea, M., et al., *Comparison of photosynthetic damage from arthropod herbivory and pathogen infection in understory hardwood saplings.* Oecologia, 2006. **149**(2): p. 221-232.
49. Jones, H.G., *Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces.* Plant Cell and Environment, 1999. **22**(9): p. 1043-1055.
50. Stokes, V.J., M.D. Morecroft, and J.I.L. Morison, *Boundary layer conductance for contrasting leaf shapes in a deciduous broadleaved forest canopy.* Agricultural and Forest Meteorology, 2006. **139**(1–2): p. 40-54.
51. Caillon, R., et al., *Warming decreases thermal heterogeneity of leaf surfaces: implications for behavioural thermoregulation by arthropods.* Functional Ecology, 2014. **28**(6): p. 1449-1458.
52. MacHardy, W.E., *Apple Scab, Biology, Epidemiology and Management*, ed. L. Tadrist. 1996: The American Phytopathology Society, St. Paul, MN.
53. Thorpe, M.R., *Radiant heating of apples.* J. Appli. Ecol., 1974. **11**: p. 755-760.
54. Gibert, C., et al., *Modelling the effect of fruit growth on surface conductance to water vapour diffusion.* Annals of Botany, 2005. **95**(4): p. 673-683.
55. Daudet, F.A., et al., *Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown. Consequences on leaf-to-atmosphere coupling and tree functions.* Agricultural and Forest Meteorology, 1999. **97**(3): p. 171-185.
56. Wigley, G. and J.A. Clark, *Heat transport coefficients for constant energy flux models of broad leaves.* Boundary Layer Meteorology, 1974. **7**(2): p. 139-150.

57. Baldocchi, D.D., K.B. Wilson, and L. Gu, *How the environment, canopy structure and canopy physiological functioning influence carbon, water and energy fluxes of a temperate broad-leaved deciduous forest—an assessment with the biophysical model CANOAK.* Tree Physiology, 2002. **22**(15-16): p. 1065-1077.
58. Baldocchi, D.D. and K.B. Wilson, *Modeling CO2 and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales.* Ecological Modelling, 2001. **142**(1–2): p. 155-184.
59. Baldocchi, D.D. and P.C. Harley, *Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. II. Model testing and application.* Plant, Cell & Environment, 1995. **18**(10): p. 1157-1173.
60. Sinoquet, H., et al., *RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies: application to an isolated tree crown.* Plant Cell and Environment, 2001. **24**(4): p. 395-406.
61. Pincebourde, S. and J. Casas, *Multitrophic biophysical budgets: Thermal ecology of an intimate herbivore insect-plant interaction.* Ecological Monographs, 2006. **76**(2): p. 175-194.
62. Pincebourde, S., et al., *Regional climate modulates the canopy mosaic of favourable and risky microclimates for insects.* Journal of Animal Ecology, 2007. **76**(3): p. 424-438.
63. Guilioni, L., et al., *A model to estimate the temperature of a maize apex from meteorological data.* Agricultural and Forest Meteorology, 2000. **100**(2-3): p. 213-230.
64. Khabba, S., J.F. Ledent, and A. Lahrouni, *Development and validation of model of heat diffusion in maize ear.* Agricultural and Forest Meteorology, 1999. **97**(2): p. 113-127.
65. Khabba, S., J.F. Ledent, and A. Lahrouni, *Maize ear temperature.* European Journal of Agronomy, 2001. **14**(3): p. 197-208.
66. Guilioni, L. and J.P. Lhomme, *Modelling the daily course of capitulum temperature in a sunflower canopy.* Agricultural and Forest Meteorology, 2006. **138**(1-4): p. 258-272.
67. Poppendiek, H., *Transient and steady-state heat transfer in irradiated citrus fruit.* Trans ASME, 1953. **75**: p. 421-425.
68. Smart, R.E. and T.R. Sinclair, *Solar heating of grape berries and other spherical fruits.* Agricultural Meteorology, 1976. **17**(4): p. 241-259.
69. Van der Vorst, H., *BiCGSTAB: A Fast and Smoothly Converging Variant of Bi-CG for the Solution of Nonsymmetric Linear Systems.* SIAM J. Sci. Stat. Comput., 1992. **13**: p. 631-644.
70. Klöckner, A., et al., *PyCUDA: GPU Run-Time Code Generation for High-Performance Computing.* CoRR, 2009. **abs/0911.3456**.
71. Wei, J.J., et al., *Numerical study of simultaneous natural convection heat transfer from both surfaces of a uniformly heated thin plate with arbitrary inclination.* Heat and Mass Transfer, 2002. **38**(4): p. 309-317.
72. Vogel, S., *The lateral thermal conductivity of leaves.* Canadian Journal of Botany, 1984. **62**: p. 741-744.
73. Armaly, B.F., T.S. Chen, and N. Ramachandran, *Correlations for laminar mixed convection on vertical, inclined and horizontal flat plates with uniform surface heat-flux.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987. **30**(2): p. 405-408.
74. Sinoquet, H., et al., *Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: an analysis from multiscale discretization of the canopy.* Plant Cell and Environment, 2005. **28**(9): p. 1158-1170.
75. Sinoquet, H., et al., *Simple equations to estimate light interception by isolated trees from canopy structure features: assessment with three-dimensional digitized apple trees.* New Phytologist, 2007. **175**(1): p. 94-106.
76. Ross, J., ed. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. 1981, Junk W. Pubs: The Hague.
77. Chazdon, R.L., *Sunflecks and Their Importance to Forest Understorey Plants*, in *Advances in Ecological Research*, M. Begon, et al., Editors. 1988, Academic Press. p. 1-63.
78. Raupach, M., J. Finnigan, and Y. Brunet, *Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy.* Boundary-Layer Meteorology, 1996. **78**: p. 351-382.
79. Simon, S., et al., *Does manipulation of fruit-tree architecture affect the development of pests and pathogens? A case study in an organic apple orchard.* Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2006. **81**(4): p. 765-773.
80. Schymanski, S.J., D. Or, and M. Zwieniecki, *Stomatal Control and Leaf Thermal and Hydraulic Capacitances under Rapid Environmental Fluctuations.* Plos One, 2013. **8**(1).
81. Adam, B., N. Donès, and H. Sinoquet, *VegeSTAR - software to compute light interception and canopy photosynthesis from images of 3D digitised plants.*, in *UMR PIAF INRA-UBP, Clermont-Ferrand*. 2002.
82. Potel A, et al., *Digitalisation tridimensionnelle des arbres pour l'analyse de systèmes de vergers pour le pommier.* Revue suisse de viticulture arboriculture horticulture,, 2005. **37**(6): p. 351-359.
83. Carter, G.A. and W.K. Smith, *Influence of Shoot Structure on Light Interception and Photosynthesis in Conifers.* Plant Physiol., 1985. **79**(4): p. 1038-1043.
84. Saltelli, A., et al., *Sensitivity analysis practices: Strategies for model-based inference.* Reliability Engineering & System Safety, 2006. **91**(10-11): p. 1109-1125.

85. King, D.M. and B.J.C. Perera, *Morris method of sensitivity analysis applied to assess the importance of input variables on urban water supply yield – A case study.* Journal of Hydrology, 2013. **477**(0): p. 17-32.
86. Scherrer, D. and C. Korner, *Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming.* Journal of Biogeography, 2011. **38**(2): p. 406-416.
87. Gonzalez-Dugo, V., et al., *Almond tree canopy temperature reveals intra-crown variability that is water stress-dependent.* Agricultural and Forest Meteorology, 2012. **154-155**: p. 156-165.
88. F. Didelot, et al., *Situation actuelle en France du contournement de la resistance Vf par Venturia inaequalis. Proposition de methodes de luttes adaptees. , Journees Techniques Fruits et Legumes Biologiques ITAB*, Editor. 8 & 9 decembre 2009: Paris.
89. De Parcevaux, S. and L. Huber, *Bioclimatologie. Concepts et applications*. 2007, Versailles (france): Editions Quae. 336 p.
90. Gennes Pierre-Gilles, d., *Gouttes, bulles, perles et ondes / Pierre-Gilles de Gennes, Françoise Brochard-Wyart, David Quéré*. Nouvelle édition avec CD-ROM ed. Échelles. 2005, Paris: Belin.
91. Magarey, R.D., T.B. Sutton, and C.L. Thayer, *A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens.* Phytopathology, 2005. **95**(1): p. 92-100.
92. Quere, D., M.J. Azzopardi, and L. Delattre, *Drops at rest on a tilted plane.* Langmuir, 1998. **14**(8): p. 2213-2216.
93. Magarey, R.D., et al., *Surface wetness duration under controlled environmental conditions.* Agricultural and Forest Meteorology, 2005. **128**(1-2): p. 111-122.
94. Liu, S., *A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies.* Ecological Modelling, 1997. **99**(2): p. 151-159.
95. Batzer, J.C., et al., *Spatial Heterogeneity of Leaf Wetness Duration in Apple Trees and Its Influence on Performance of a Warning System for Sooty Blotch and Flyspeck.* Plant Disease, 2008. **92**(1): p. 164-170.
96. Schmitz, H.F. and R.H. Grant, *Precipitation and dew in a soybean canopy: Spatial variations in leaf wetness and implications for Phakopsora pachyrhizi infection.* Agricultural and Forest Meteorology, 2009. **149**(10): p. 1621-1627.
97. Simon, S., B. Sauphanor, and P.E. Lauri, *Control of fruit tree pests through manipulation of tree architecture.* Pest Technology, 2007. **1**(1): p. 33-37.
98. Masson, V., C.S.B. Grimmond, and T.R. Oke. *Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities*. [Text] 2002; Available from: https://open.library.ubc.ca/collections/52383/items/1.0041955.
99. Personne, E., et al., *SURFATM-NH3: a model combining the surface energy balance and bi-directional exchanges of ammonia applied at the field scale.* Biogeosciences, 2009. **6**(8): p. 1371-1388.
100. Imbert, C., S. Bhattacharjee, and J. Tencar, *Simulation of urban microclimate with SOLENE-microclimat: an outdoor comfort case study*, in *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*. 2018, Society for Computer Simulation International: Delft, Netherlands. p. Article 26.
101. Sonohat, G., et al., *Three-dimensional reconstruction of partially 3D-digitized peach tree canopies.* Tree Physiology, 2006. **26**(3): p. 337-351.
102. Ameglio, T., et al., *PepiPIAF: a new generation of biosensors for stress detections in perennial plants*, in *ISHS 2010 - S15: Climawater 2010*. 2010: Lisbonne, Portugal. p. 1 p.
103. Prasad, P.V.V. and M. Djanaguiraman, *Response of floret fertility and individual grain weight of wheat to high temperature stress: sensitive stages and thresholds for temperature and duration.* Functional Plant Biology, 2014. **41**(12): p. 1261-1269.
104. Asseng, S., et al., *Rising temperatures reduce global wheat production.* Nature Climate Change, 2015. **5**(2): p. 143-147.
105. Semenov, M.A., M. A., P. Martre, P., and P.D. Jamieson, P. D., *Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach.* Agricultural and Forest Meteorology, 2009. **149**(6-7): p. 1095-1104.
106. Duursma, R.A. and B.E. Medlyn, *MAESPA: a model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to [CO2] × drought interactions.* Geosci. Model Dev., 2012. **5**(4): p. 919-940.
107. Dufour-Kowalski S., C.B., Dreyfus P., Meredieu C., de Coligny F., *Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling.* Annals of Forest Science, 2012. **69**: p. 221-233.
108. Jonard, M., et al., *HETEROFOR 1.0: a spatially explicit model for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions – Part 1: Carbon fluxes and tree dimensional growth.* Geosci. Model Dev., 2020. **13**(3): p. 905-935.
109. Gaudio N., et al., *RReShar (Regeneration and Resource Sharing): A model to simulate uneven-aged forest stand dynamics*, in *7th IUFRO international conference on 21st Century forestry: Integrating ecologically based, uneven-aged silviculture with increased demands for forests*. 2010, University of Ljubljana, Department of Forestry and Renewable Resources: Ljubjana, Slovenia. p. 64-64.

110. Gaughan JB, M.T., Holt SM, Lisle A, *A new heat load index for feedlot cattle.* J Anim Sci., 2008 **86**(1): p. 226-234.
111. Pisek, J., et al., *Is the spherical leaf inclination angle distribution a valid assumption for temperate and boreal broadleaf tree species?* Agricultural and Forest Meteorology, 2013. **169**: p. 186-194.
112. Falster, D.S. and M. Westoby, *Leaf size and angle vary widely across species: what consequences for light interception?* New Phytologist, 2003. **158**(3): p. 509-525.
113. Wang, W.M., Z.L. Li, and H.B. Su, *Comparison of leaf angle distribution functions: Effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage.* Agricultural and Forest Meteorology, 2007. **143**(1–2): p. 106-122.
114. Campbell, G.S., *Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution.* Agricultural and Forest Meteorology, 1986. **36**(4): p. 317-321.
115. Barbacci, A., et al., *A robust videogrametric method for the velocimetry of wind-induced motion in trees.* Agricultural and Forest Meteorology, 2014. **184**(0): p. 220-229.
116. Py, C., et al., *Measurement of wind-induced motion of crop canopies from digital video images.* Agricultural and Forest Meteorology, 2005. **130**(1-4): p. 223-236.
117. Bert, C.W., *Material damping: An introductory review of mathematic measures and experimental technique.* Journal of Sound and Vibration, 1973. **29**(2): p. 129-153.
118. Sievänen, R., et al., *Functional–structural plant models: a growing paradigm for plant studies.* Annals of Botany, 2014. **114**(4): p. 599-603.
119. Still, C., et al., *Thermal imaging in plant and ecosystem ecology: applications and challenges.* Ecosphere, 2019. **10**(6): p. e02768.
120. Lin, D., et al., *Fusion of thermal imagery with point clouds for building façade thermal attribute mapping.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019. **151**: p. 162-175.
121. Pearcy, R.W., L.J. Gross, and D. He, *An improved dynamic model of photosynthesis for estimation of carbon gain in sunfleck light regimes.* Plant, Cell & Environment, 1997. **20**(4): p. 411-424.
122. Buckley, T.N., *The control of stomata by water balance.* New Phytologist, 2005. **168**(2): p. 275-292.
123. Lawson, T. and M.R. Blatt, *Stomatal Size, Speed, and Responsiveness Impact on Photosynthesis and Water Use Efficiency.* Plant Physiology, 2014. **164**(4): p. 1556-1570.
124. Kang, H.-X., et al., *Concurrent Increases in Leaf Temperature With Light Accelerate Photosynthetic Induction in Tropical Tree Seedlings.* Frontiers in Plant Science, 2020. **11**.
125. Monsi, M. and T. Saeki, *On the Factor Light in Plant Communities and its Importance for Matter Production.* Annals of Botany, 2005. **95**(3): p. 549-567.
126. Soma, M., F. Pimont, and J.-L. Dupuy, *Sensitivity of voxel-based estimations of leaf area density with terrestrial LiDAR to vegetation structure and sampling limitations: A simulation experiment.* Remote Sensing of Environment, 2021. **257**: p. 112354.
127. Valle, B.t., *Modélisation et optimisation de la croissance de la laitue dans un système agrivoltaïque dynamique*, in *PhD Ecophysiologie et adpatation des plantes*. 2017, SupAgro: Montpellier.
128. Mayr, S. and T. Ameglio, *Freezing Stress in Tree Xylem*, in *Progress in Botany 77*. 2016, Springer International Publishing. p. 435 p.
129. Graf, I., M. Ceseri, and J.M. Stockie, *Multiscale model of a freeze–thaw process for tree sap exudation.* Journal of The Royal Society Interface, 2015. **12**(111): p. 20150665.
130. Cochard, H., et al., *SurEau: a mechanistic model of plant water relations under extreme drought.* Annals of Forest Science, 2021. **78**(2): p. 55.
131. Mballo, S., et al., *Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment.* Urban Climate, 2021. **37**: p. 100844.
132. Dupont, S. and Y. Brunet, *Edge Flow and Canopy Structure: A Large-Eddy Simulation Study.* Boundary-Layer Meteorology, 2008. **126**(1): p. 51-71.