SYLVABIOM : Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques

Jean-Charles Bastien

▶ **To cite this version:**

Jean-Charles Bastien. SYLVABIOM : Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques. Journées Scientifiques AGPF, Dec 2013, Orléans, France. hal-02804920

HAL Id: hal-02804920
https://hal.inrae.fr/hal-02804920

Submitted on 5 Jun 2020

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.

SYLVABIOM

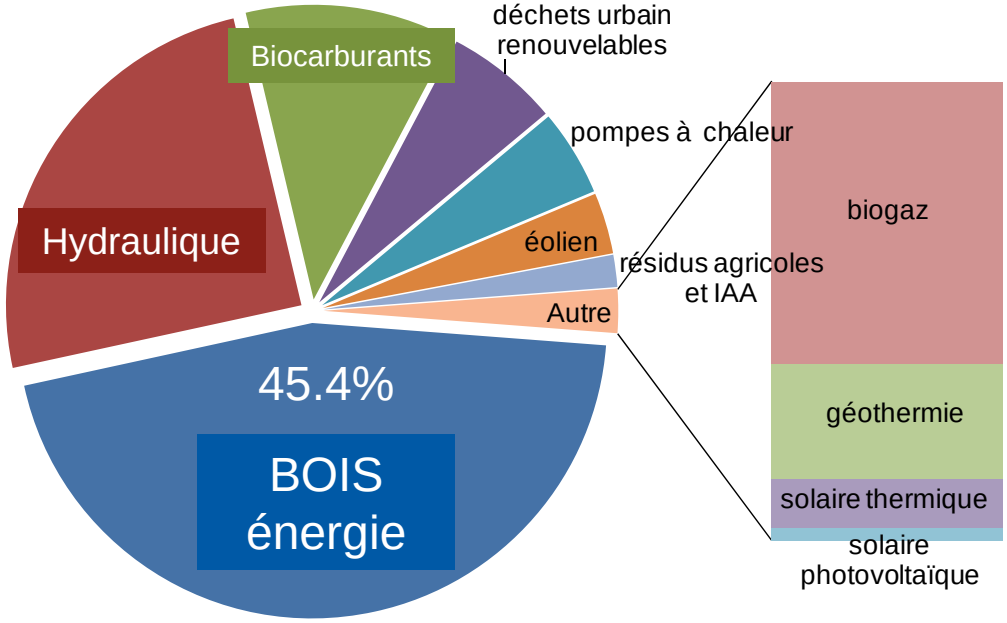
Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques

Programme Bioénergies Edition 2008

novembre 2008 – mai 2013

Orléans Nancy LBLGC

Le Bois : une énergie renouvelable en France



Source : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable 2009

Disponibilité annuelle en bois énergie

Aujourd'hui:

Sources : bois de feu + bois d'industrie + branches
coproduits de l'industrie du bois

FEUILLUS : 40 millions m^3 / an
RESINEUX : 10 millions m^3 / an

Total : 50 millions m^3 / an (10 millions tep /an)

Quelles disponibilité de bois « supplémentaire » ?

(objectif : 23% d'énergies renouvelables en 2020) **:**

Sources : résidus d'exploitation forestière

plantations dédiées ou semi-dédiées

Total : +19 millions m^3 / an $\approx$ + 4 millions tep /an

Source IFN, FCBA – 2010

Contexte et problématique

En complément de ce que fournit la forêt « classique », on peut imaginer des cultures dédiées

- **T(T)CR : Taillis à (Très) Courte Rotation**
  - Espèces réitérantes (aptes au rejet de souche)
  - 1 000 à 15 000 tiges/ha
  - rotations de 2 à 10 ans

TCR Peuplier

TTCR Saule

- **FCR : Futaie à Courte Rotation :**
  - Espèces non réitérantes
  - 1 000 à 3 000 tiges/ha
  - révolution de moins de 20 ans

Mélèze hybride

Cupressocyparis

Contexte et problématique

En complément de ce que fournit la forêt « classique », on peut imaginer des cultures dédiées

TCR et FCR sont des peuplements forestiers particuliers :

- Pas d'accumulation de biomasse à long terme

- Prélèvements importants (N,P,K) par rapport à des peuplements forestiers classiques

➔ **appauvrissement possible du milieu**

➔ **Nécessité d'optimiser et de maintenir la production tout en préservant le milieu**

➔ **Besoin de documenter et d'améliorer la conduite de ce type de peuplement sous nos latitudes**

Objectifs du projet SYLVABIOM

Etudier l'effet de trois facteurs :

1- Plante : peuplier, robinier, saule, divers résineux

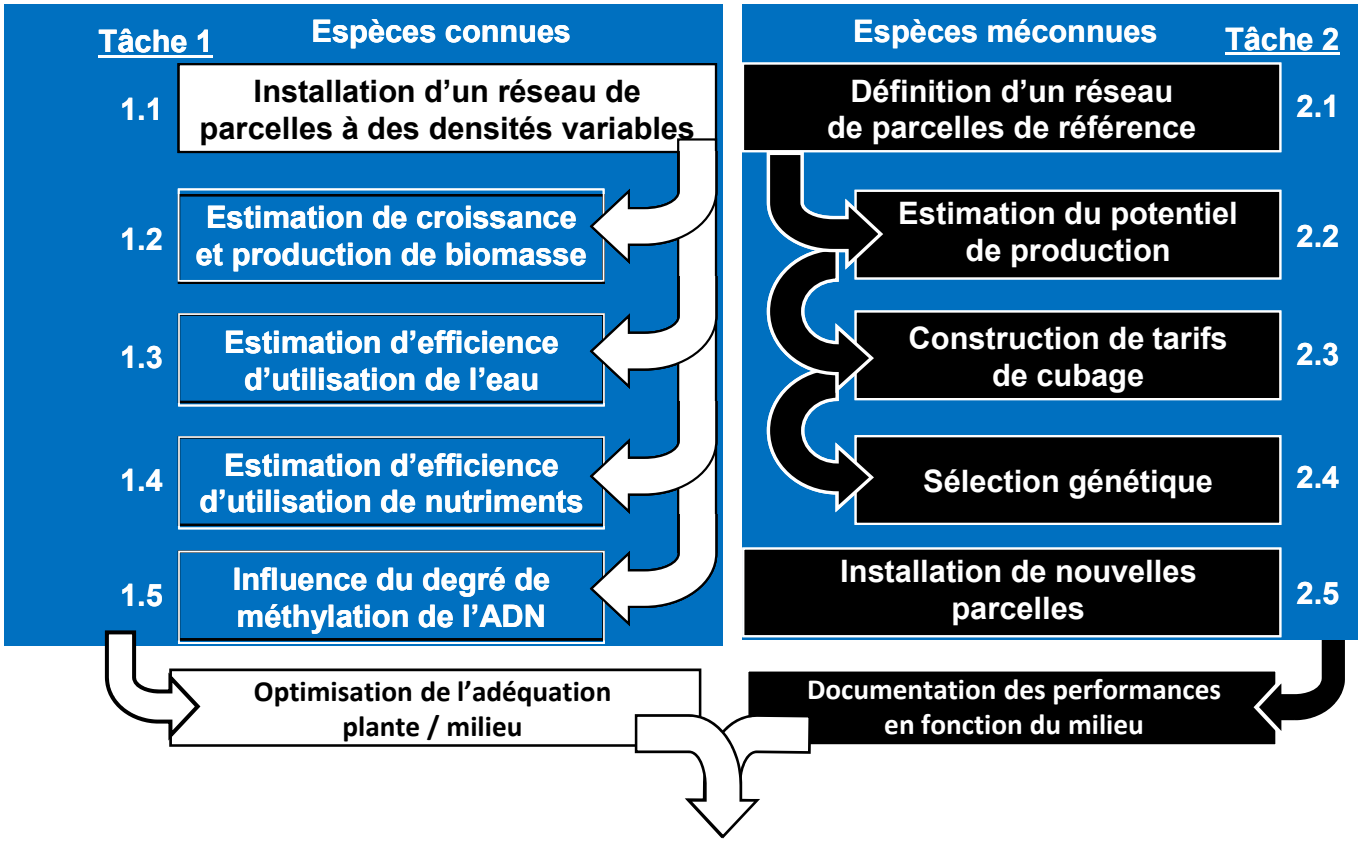
2- Méthode de culture : Taillis / Futaie

3- Contextes pédoclimatiques : sites contrastés

sur la productivité et l'efficience d'utilisation de l'eau et des nutriments

Objectifs du projet SYLVABIOM

Comparaison du potentiel de production de TCR, TTCR et futaies composés d'une large gamme d'espèces pour des conditions environnementales et de sylviculture variées



Aide au choix raisonné d'espèces en fonction du milieu pour la mise en place fructueuse de TCR, TTCR et futaies

Les partenaires du projet SYLVABIOM

Jean-Charles Bastien	*Céline Gerstch*	*Thomas Servouse*
Guillaume Bodineau	*Florian Hullin*	*Sarah Thibaud*
Jean Gauvin	*Adrien Leon*	
Dominique Veisse	*Bénédicte Rollin*	
Erwin Dallé	*Bénédicte Rollin*	
Nicolas Marron	*Julien Toillon*	
Alain Berthelot	*Nicolas Esner*	
Thierry Fauconnier	*Patrice Maine*	
Jean-Yves Gautry		
Franck Brignolas	*Julien Clémot*	
Stéphane Maury	*Céline Cottier*	
Alain Delaunay	*Julien Toillon*	
Isabelle Le Jan		
François Charnet	*Pierre Barron*	
Dominique Merzeau		
Olivier Forestier		

Quelques résultats du projet

1. Production et plasticité de l'efficience de l'utilisation de l'eau et de l'azote chez les salicacées cultivées en T(T)CR.

2. Méthylation de l'ADN, un descripteur précoce de l'aptitude à la production de biomasse en T(T)CR.

3. Potentiel de production de biomasse totale d'espèces ligneuses à croissance rapide cultivées en futaie à courte révolution.

1. Production et plasticité de l'efficience de l’utilisation de l'eau et de l'azote chez les salicacées cultivées en T(T)CR.

Rappels sur les sites

- 4 sites SYLVABIOM
  - Echigey
  - Saint-Cyr-en-Val
  - Guémené-Penfao
  - Brinon-sur-Sauldre

+ 3 sites de TTCR de peuplier (FCBA, projet Biomagri)

Rappels sur les sites

Sol optimal pour le peuplier (Echigey),

Sols moins fertiles (Guémené, Saint-Cyr), essences plus plastiques (saule, robinier),

→ 2 sylvicultures comparées : TCR vs. TTCR

→ un site dédié aux aspects épandage de boues sur saules (Brinon).

Facteur	Espèce	Site 1 : Echigey (21)	Site 2 : Saint-Cyr-en-Val (45)	Site 3 : Guémené-Penfao (44)	Site 4 : Brinon-sur-Sauldre (18)
Sylviculture	Peuplier	X	X	X	
	Saule		X	X	
	Robinier			X	
Génétique	Peuplier	X	X		
	Saule		X		X
	Robinier			X	
Epandage	Peuplier				
	Saule				X
	Robinier				

Calendrier des âges et des récoltes

Parcelle	Essence	Essai	2009	2010	2011	2012	2013	*2014*	*2015*
Echigey	Peuplier	Futaie Dorskamp	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans	*6 ans*	*7 ans*
	Peuplier	TCR Dorskamp	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans	*6 ans*	*7 ans*
	Peuplier	TTCR Dorskamp	1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*	*0-2-3-2 ans*
	Peuplier	test clonal TCR	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans	*6 ans*	*7 ans*
	Peuplier	test clonal TTCR	1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*	*0-2-3-2 ans*
	Saule	TTCR	1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*	*0-2-3-2 ans*
Saint-Cyr-en-Val	Peuplier	TCR Dorskamp		1 an	2 ans	3 ans	4 ans	*5 ans*	*6 ans*
	Peuplier	TTCR Dorskamp		1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*
	Peuplier	test clonal TCR		1 an	2 ans	3 ans	4 ans	*5 ans*	*6 ans*
	Peuplier	test clonal TTCR		1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*
	Saule	test sylvicole TTCR		1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*
	Saule	test clonal TTCR		1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*
Guémené-Penfao	Peuplier	TCR Dorskamp	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans	*6 ans*	*7 ans*
	Peuplier	TTCR Dorskamp	1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*	*0-2-3-2 ans*
	Saule	test sylvicole TTCR	1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*	*0-2-3-2 ans*
	Robinier	test clonal TCR	1 an	2 ans	3 ans	4 ans	5 ans	*6 ans*	*7 ans*
	Robinier	test clonal TTCR	1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*	*0-2-3-2 ans*
Brinon-sur-Sauldre	Saule	test sylvicole TTCR	1 an	2 ans	0-2-1 an	0-2-2 ans	0-2-3 ans	*0-2-3-1 an*	*0-2-3-2 ans*

1ère rotation
2ème rotation
3ème rotation

= récolte

Aujourd'hui

ECHIGEY peuplier cv. Dorskamp

TTCR (7200 t/ha) TCR (1400 t/ha) Futaie (200 t/ha)

ECHIGEY peuplier cv. Dorskamp

TCR (1400 t/ha)

TTCR (7200 t/ha)

Résultats peuplier cv. Dorskamp

ECHIGEY – 4 ans

TTCR :

- 1ère rot. **3,4** ts/ha/an
- 2ème rot. **4,7** ts/ha/an

TCR :

- 1ère rot. **5,8** ts/ha/an à 4 ans,

prévision de 10 à 11 ts/ha/an vers 7 ou 8 ans

Futaie :

- pas d'estimation

GUEMENE – 4 ans

TTCR :

- 1ère rot. **0,4** ts/ha/an
- 2ème rot. **3,0** ts/ha/an

TCR :

- 1ère rot. **0,6** ts/ha/an à 4 ans,

prévision de 4 à 5 ts/ha/an vers 7 ou 8 ans

St CYR – 3 ans

TTCR :

- 1ère rot. **0,8** ts/ha/an
- 2ème rot. (1 an) **rejets de 1,9 m**

TCR :

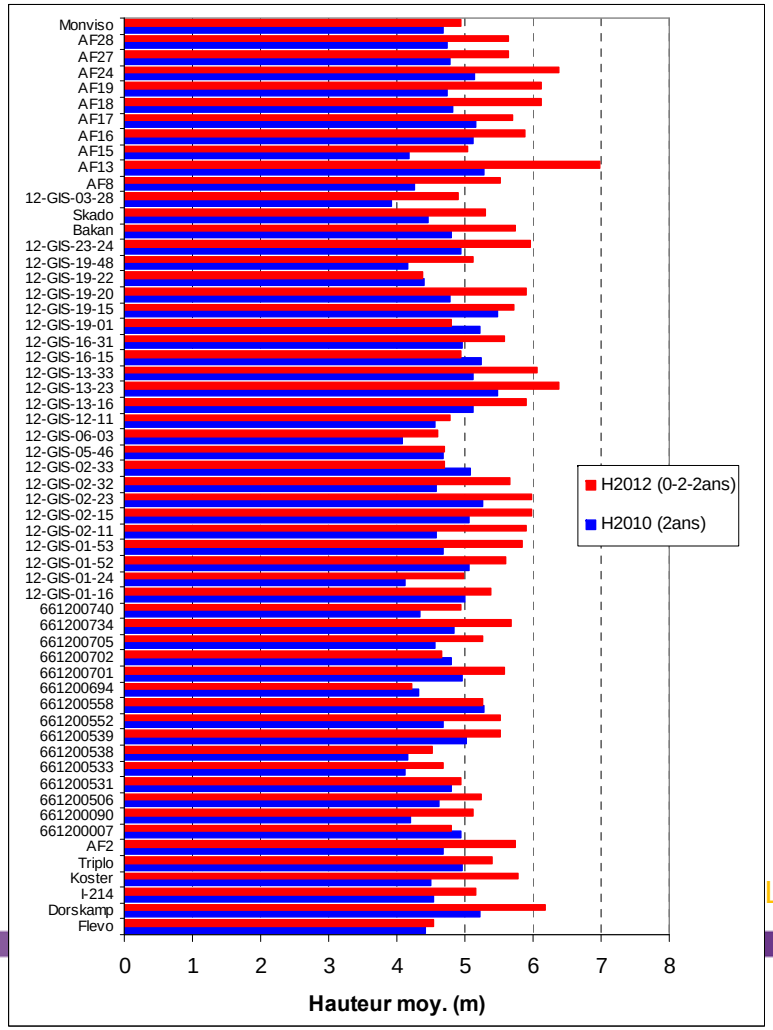
- 1ère rot. **0,5** ts/ha/an à 4 ans,

prévision de 4 à 5 ts/ha/an vers 10 ou 12 ans

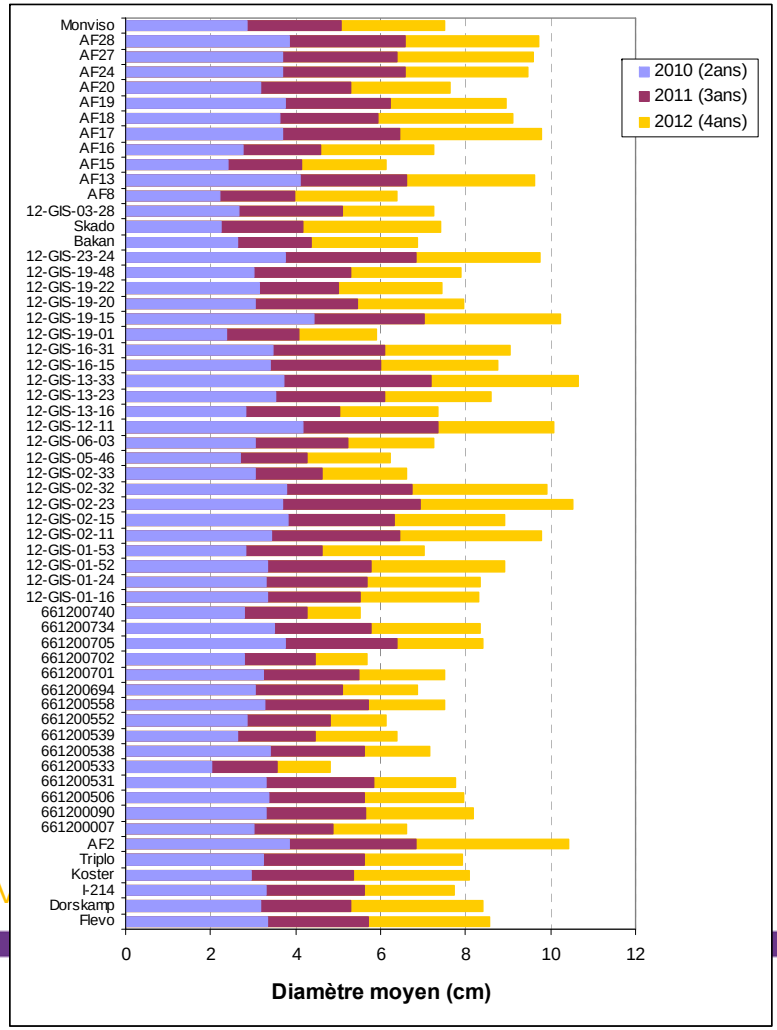
Résultats tests clonaux peupliers

Echigey – 4 ans

TTCR :

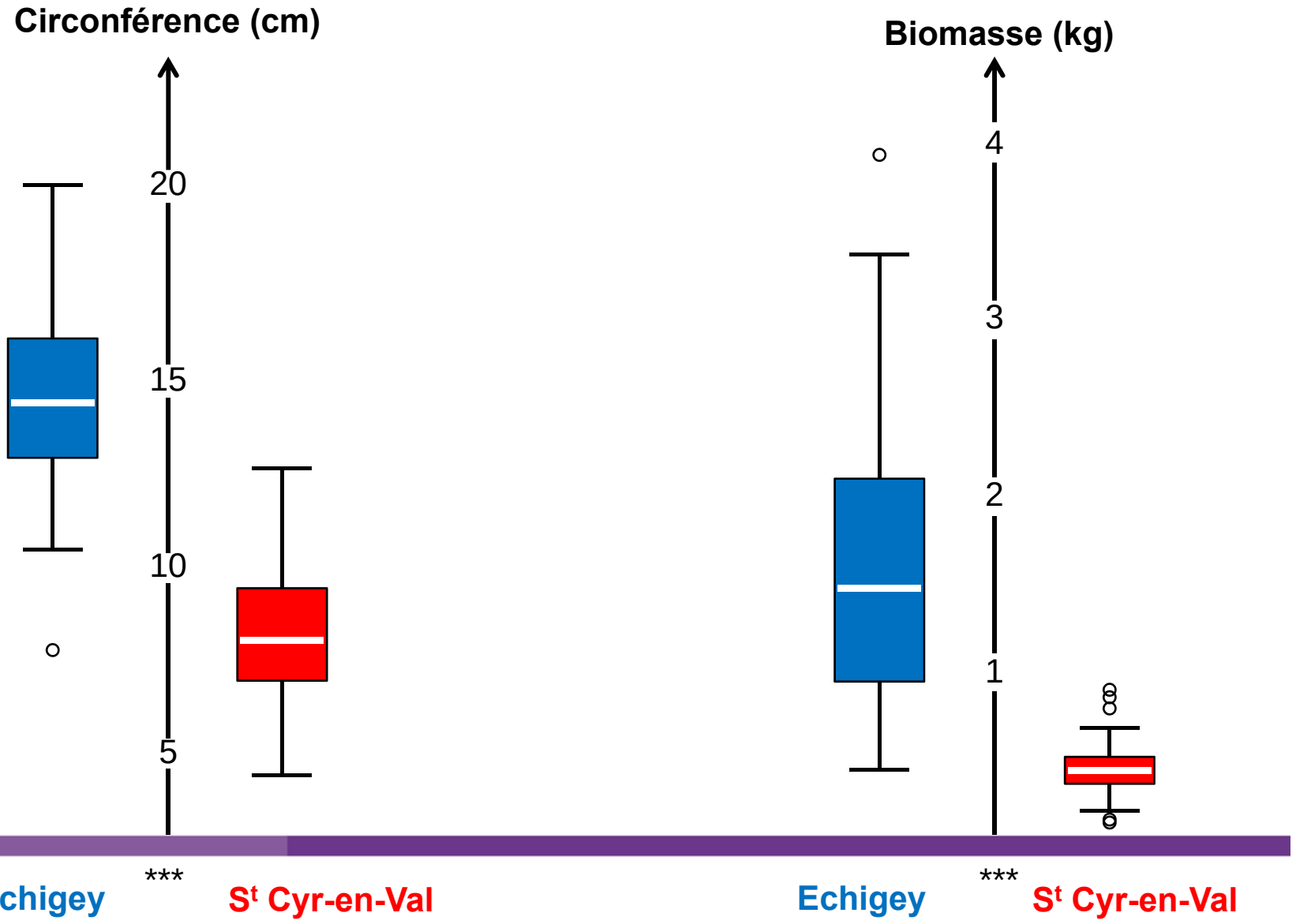


TCR :



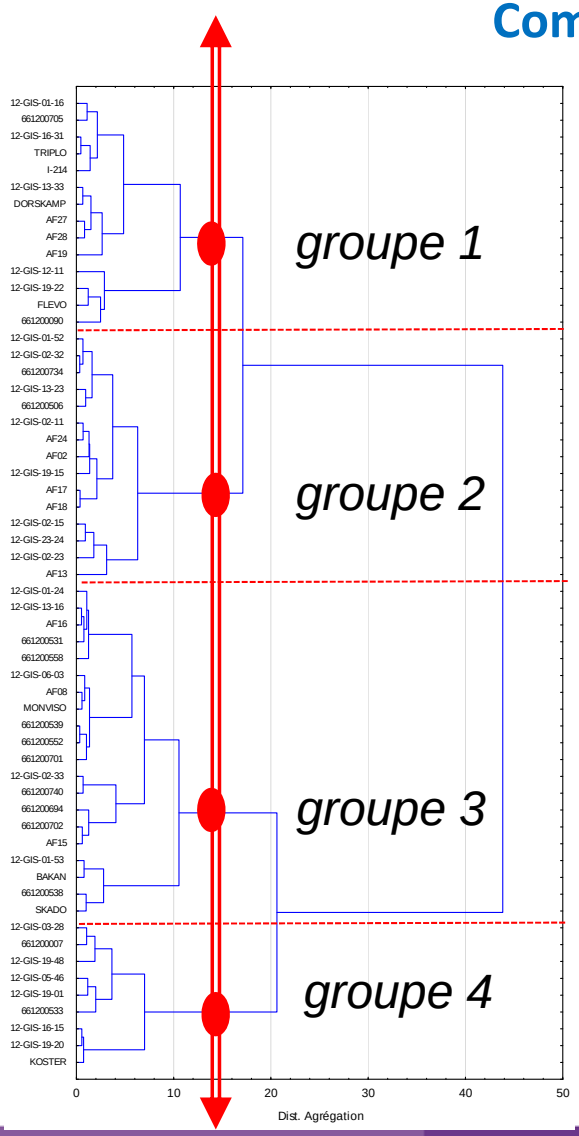
Résultats tests clonaux peupliers

Comparaison Echigey – St Cyr



Résultats tests clonaux peupliers

Comparaison Echigey – St Cyr

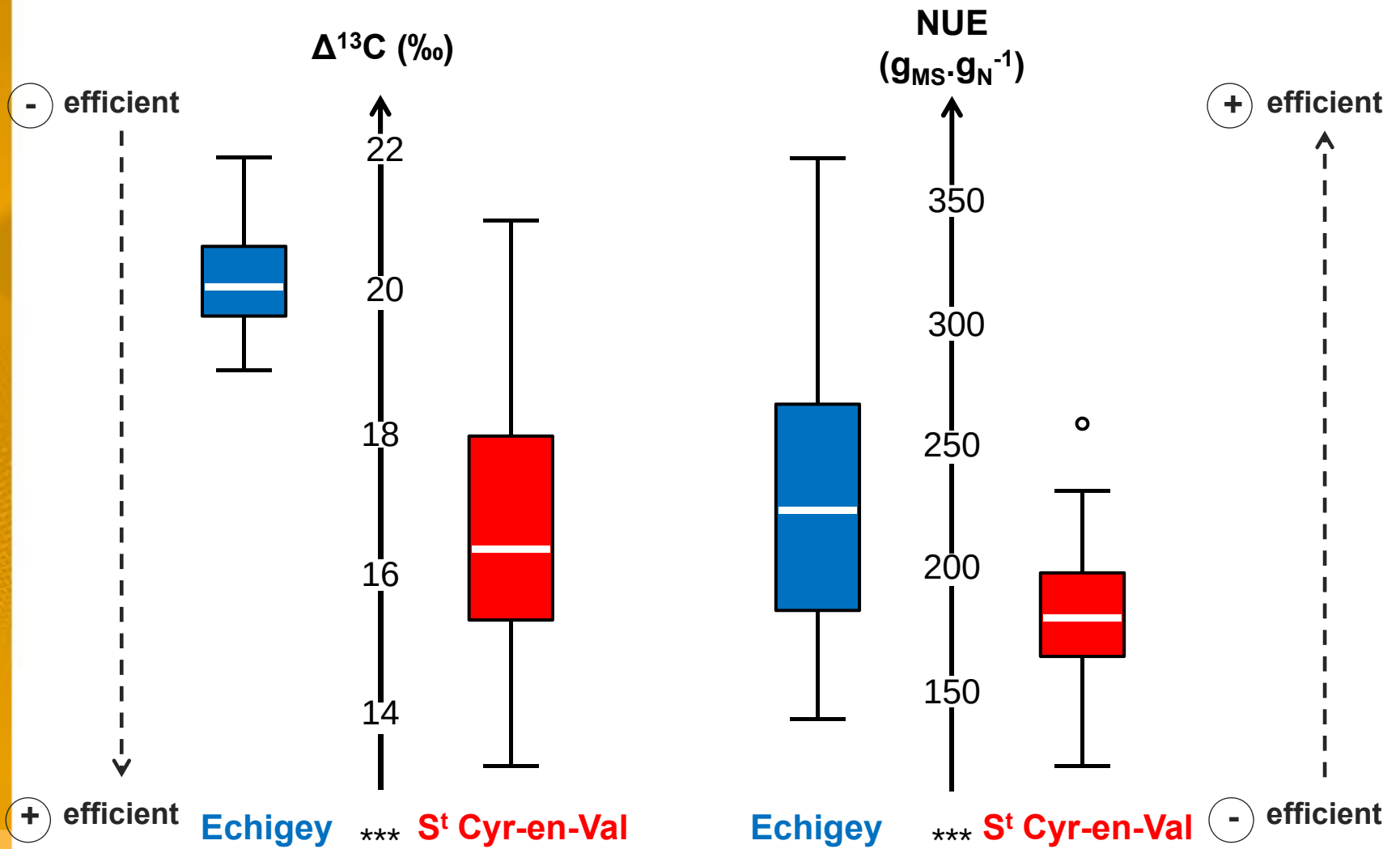


→ ACP puis CAH sur données de croissance : détermination de 4 groupes de clones

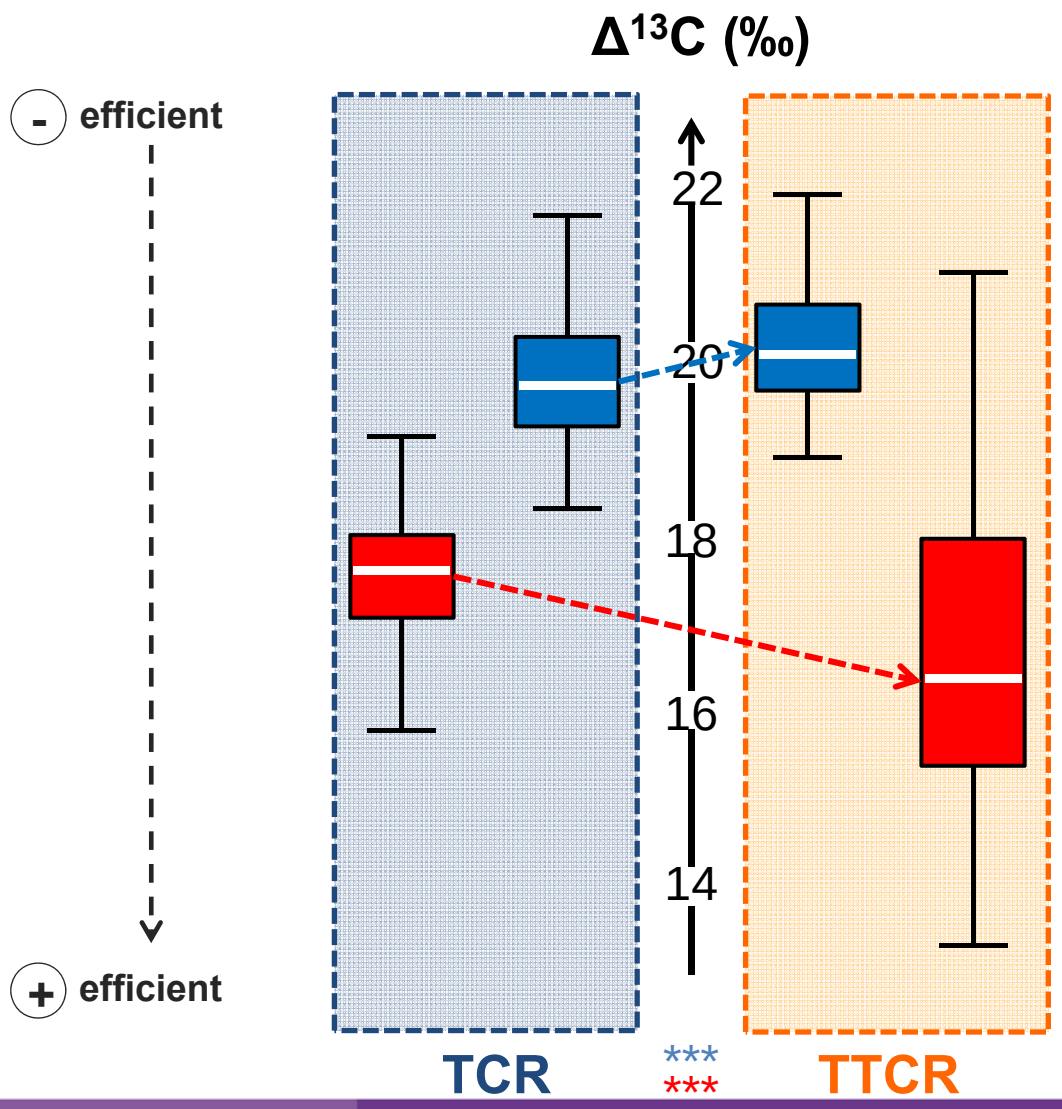
- groupe 1 : 14 clones bons à Echigey et moyens à St Cyr (surtout dans TTCR)
- groupe 2 : 15 clones bons partout,
- groupe 3 : 20 clones plutôt mauvais à Echigey et bons à St Cyr (surtout dans TTCR)
- groupe 4 : 9 clones moyens à Echigey et mauvais à St Cyr

→ à juger définitivement après plusieurs recépages...

Plasticité de WUE et NUE en TTCR de peuplier



Plasticité de WUE en TCR et TTCR de peuplier

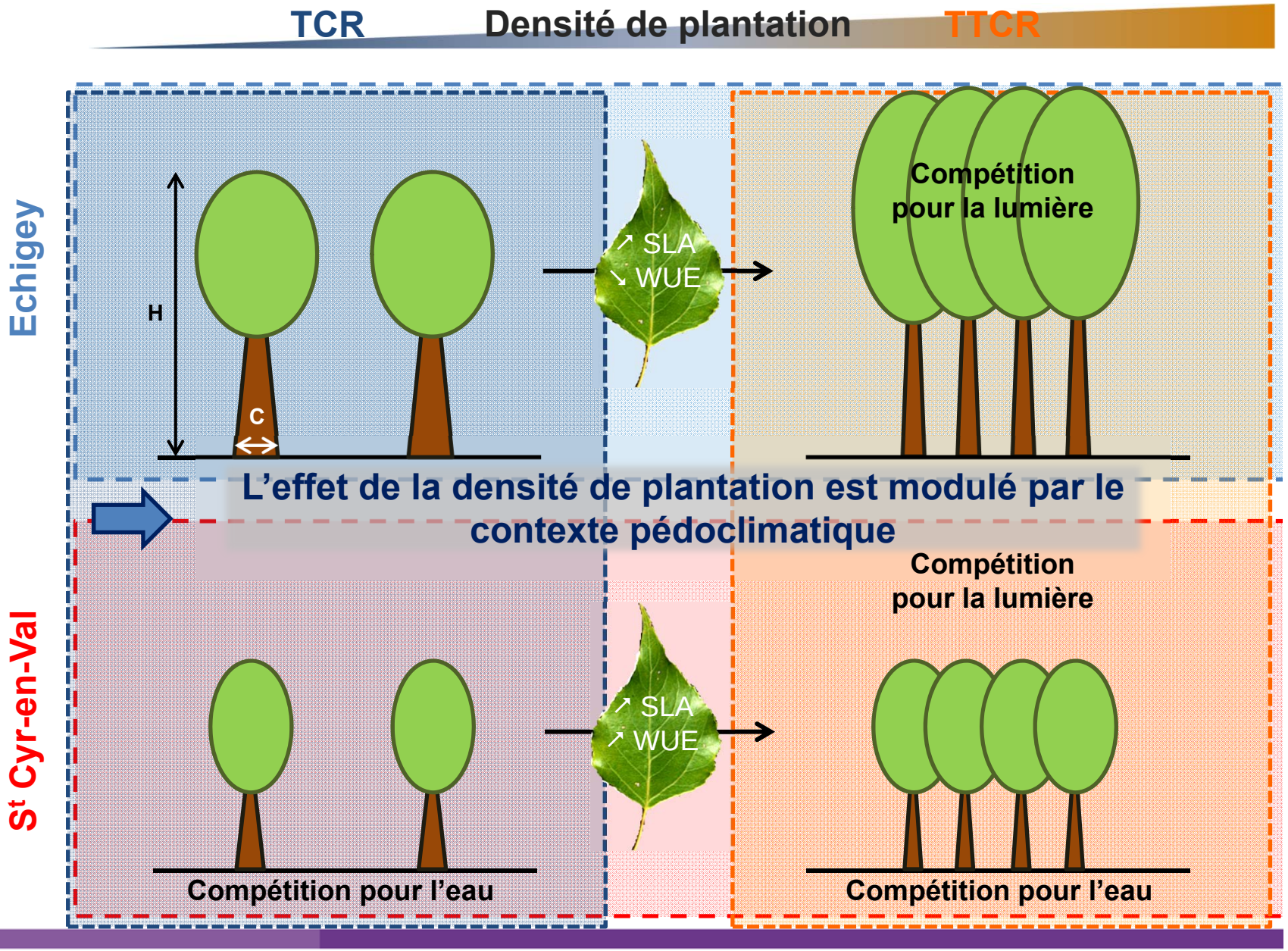


Echigey
St Cyr-en-Val

Compétition pour la lumière

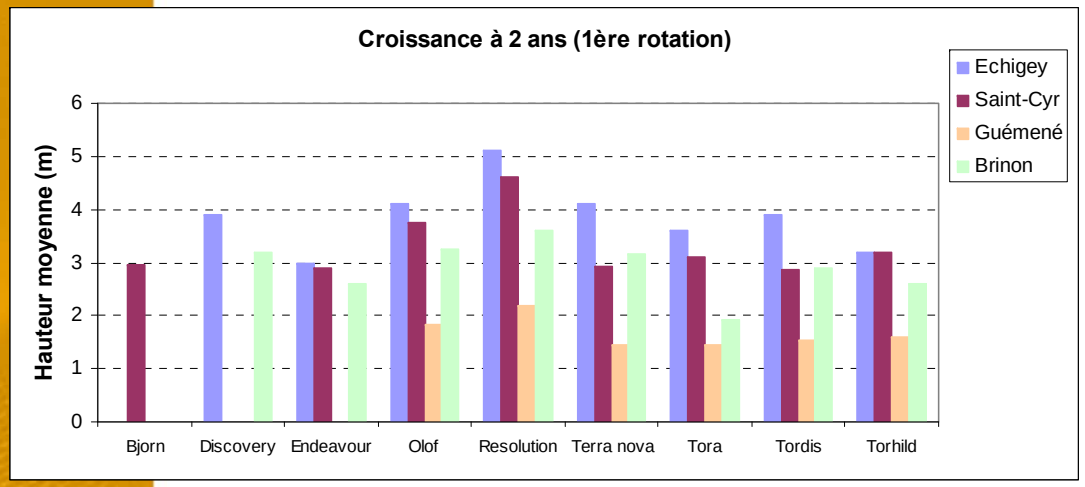
$WUE_i = A/g_s$

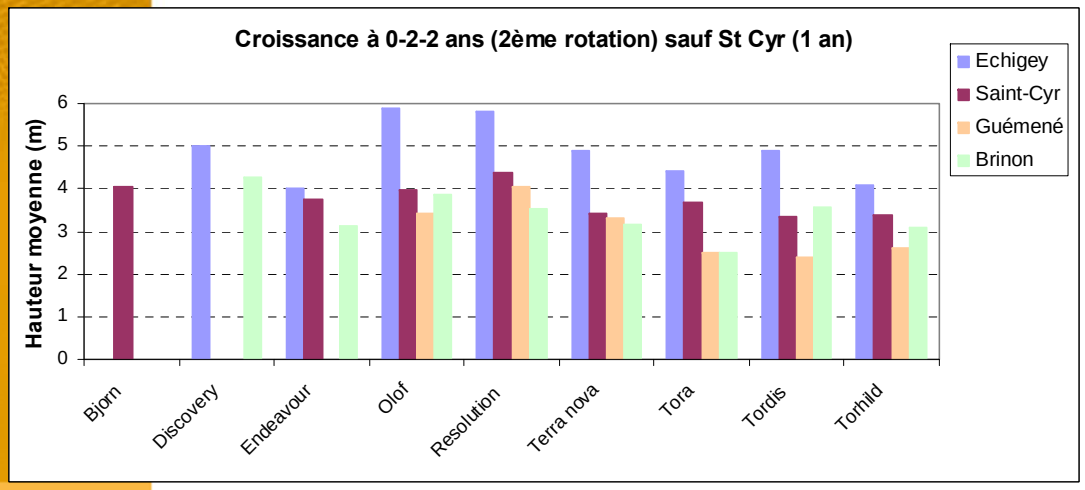
Compétition pour l'eau


TCR
Densité de plantation
TTCR
Echigey
H
C
↗ SLA
↘ WUE
Compétition pour la lumière
L'effet de la densité de plantation est modulé par le contexte pédoclimatique
St Cyr-en-Val
↗ SLA
↗ WUE
Compétition pour la lumière
Compétition pour l'eau
Compétition pour l'eau

Comparaison des tests clonaux saule

4 sites, comparaison de 4 clones anglo-saxons et 5 clones suédois.





Productions moyennes : ,

- **St Cyr**

1e rotation (2ans) : 2,0 ts/ha/an
2e rotation (1 an) : 3,5 ts/ha/an

- **Guémené**

1e rotation (2 ans) : 0,5 ts/ha/an
2e rotation (2 ans) : 2,0 ts/ha/an

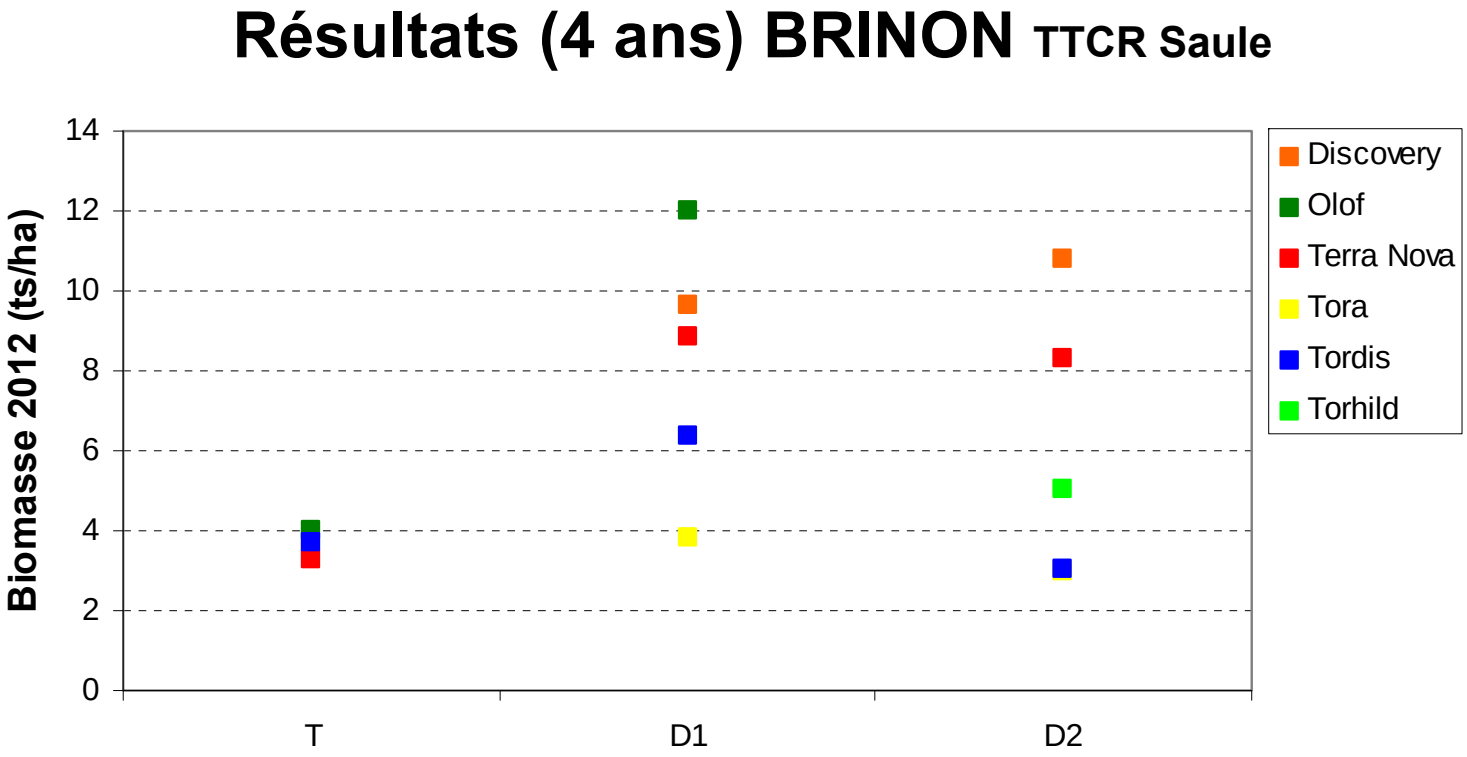
Clones UK plutôt plus performants Resolution, Discovery, Endeavour et Terra Nova,

• Clones suédois plutôt « moyens » sauf Olof assez performant.

→ forte interaction clones*sites

→ à juger définitivement après plusieurs recépages...

Facteur apport de boues de STEP



Malgré l'abandon de quelques placeaux (forte mortalité après recépage) et une forte hétérogénéité entre placeaux, effet positif des apports de boues par rapport au témoin (pas d'effet dose)

Conclusion et perspectives

Conclusion

- objectifs de production

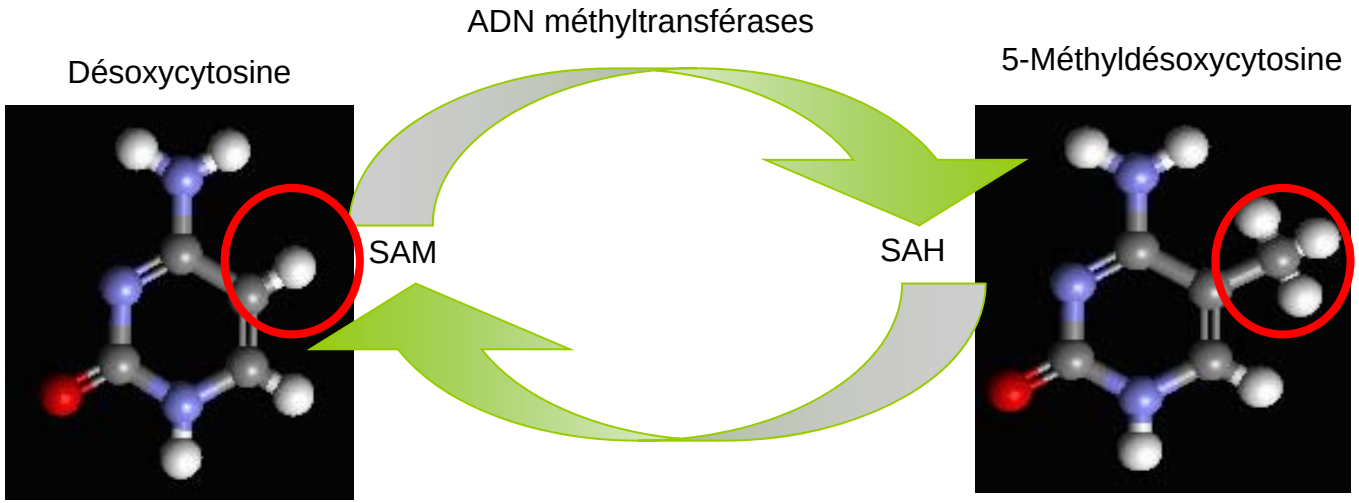
  - Peuplier : de 10 à 12 ts/ha/an accessibles en bon sols
  - Saule : de 5 à 10 ts/ha/an accessibles - essence adaptée à des terrains moins fertiles

- fort potentiel de gain en adaptant les variétés
- apports de produits résiduaires bénéfiques à la productivité

Perspectives

- Poursuivre les entretiens des parcelles,
- Maintenir les efforts de récolte des TTCR (tous les 3 ans) pour garder les dispositifs sylvicoles valides,
- Poursuivre la collecte de données de croissance, de production,
- Valoriser les dispositifs sur d'autres thématiques : Carbone dans le sol - Ecophysio - Biodiversité - etc.

2. Méthylation de l'ADN, un descripteur précoce de l'aptitude à la production de biomasse en T(T)CR



Matériel biologique

2 organes : apex caulinaire et jeune feuille (1er rang >20 mm long)

2 densités de culture : TCR et TTCR (feuilles) que TTCR pour apex

2 environnements pédoclimatiques : Echigey et Saint-Cyr

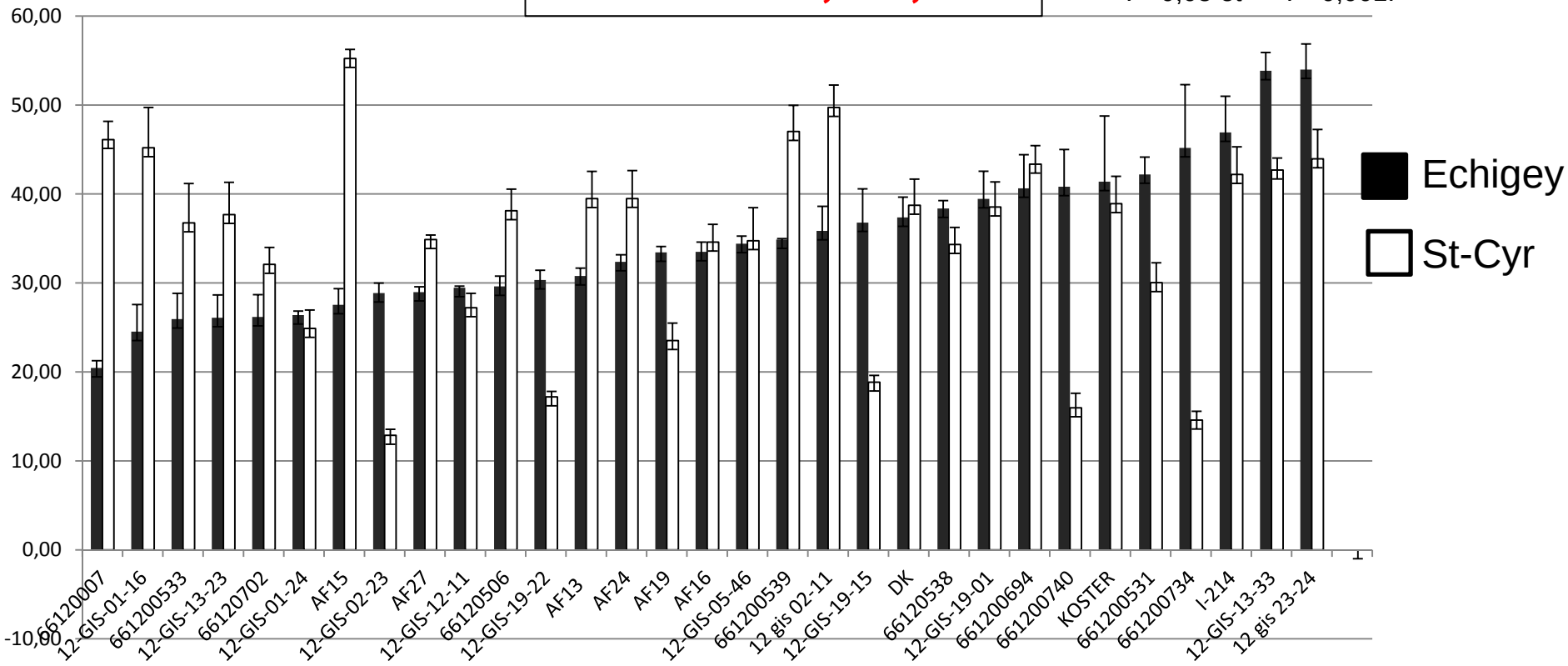
31 génotypes

Variabilité génétique de la méthylation ADN (apex) et interaction avec l'environnement pédoclimatique

%mC

E x G * ; G ; E**

- 31 génotypes 2 ans en TTCR
- * *P*<0,05 et *** *P*<0,001.

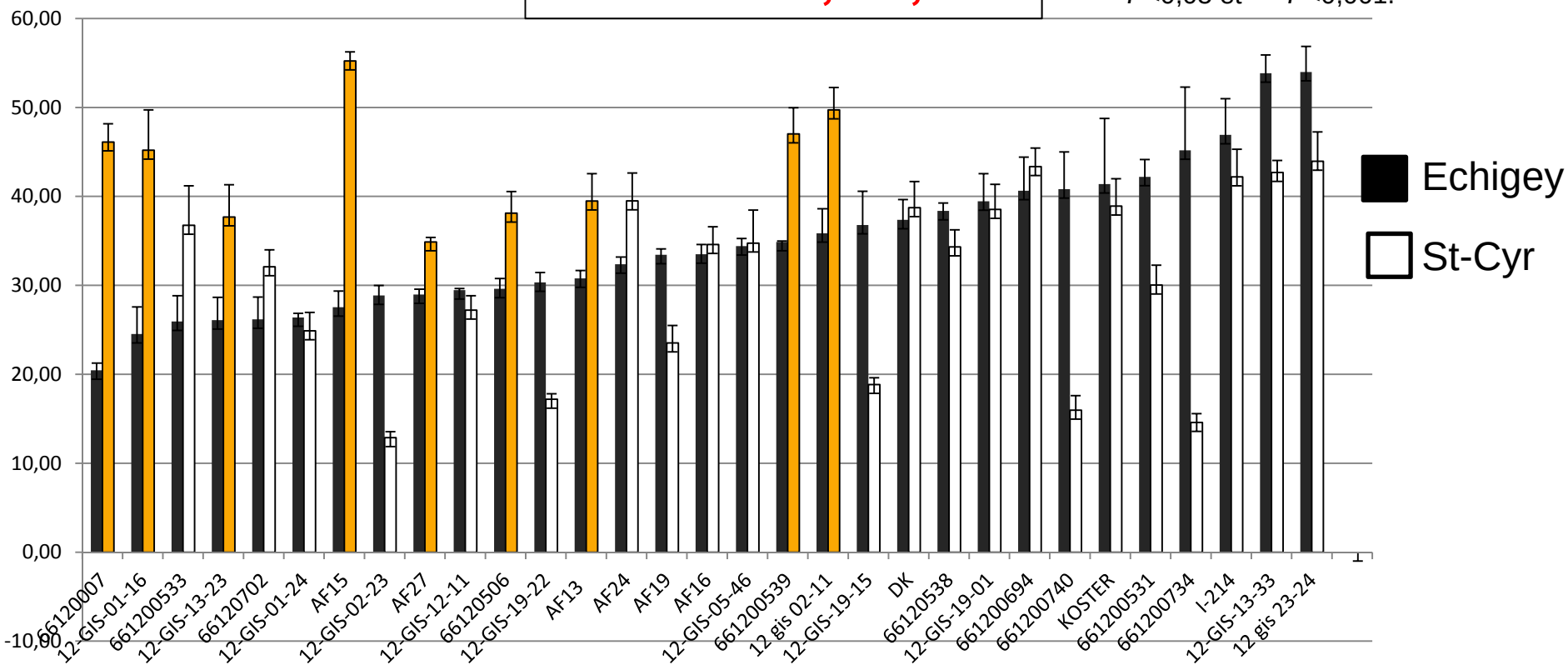


Variabilité génétique de la méthylation ADN (apex) et interaction avec l'environnement pédoclimatique

%mC

E x G * ; G ; E**

- 31 génotypes 2 ans en TTCR
- * *P*<0,05 et *** *P*<0,001.



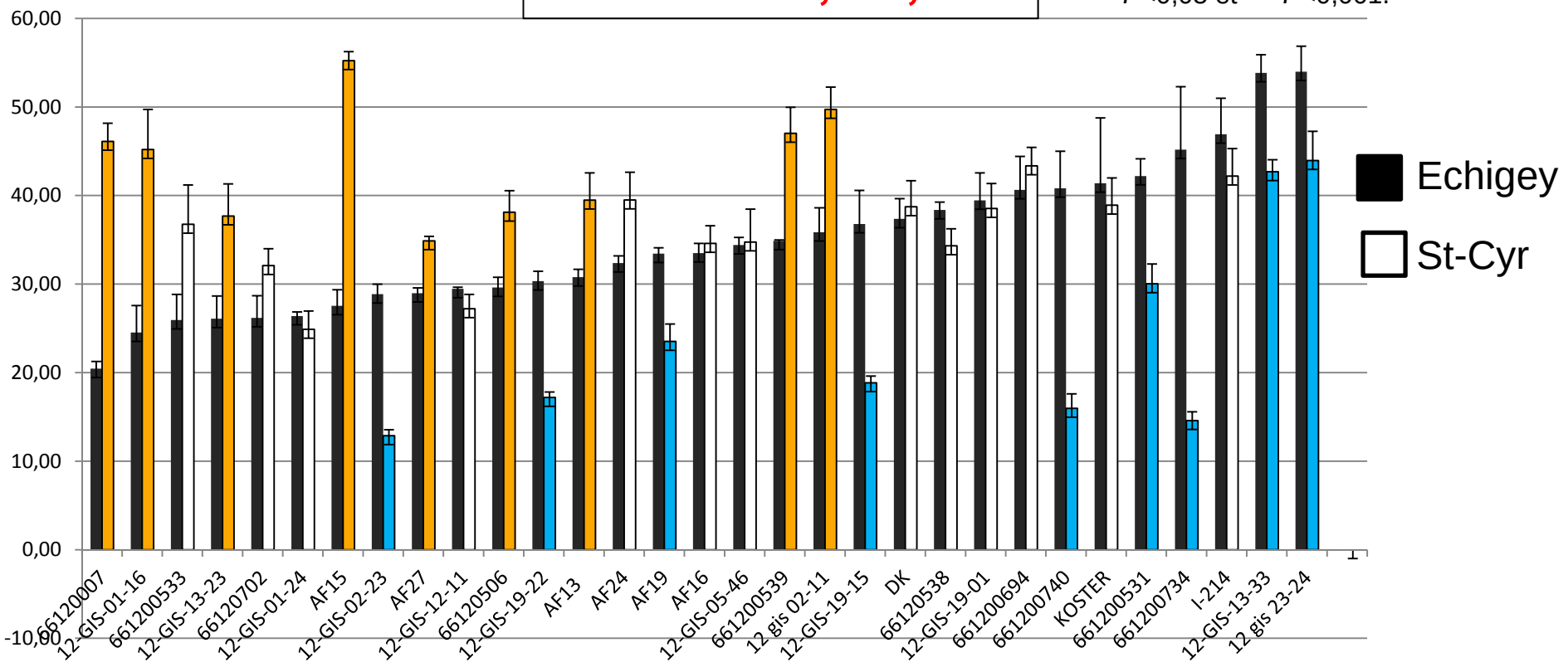
9 Hyperméthylation à St-Cyr / Echigey

Variabilité génétique de la méthylation ADN (apex) et interaction avec l'environnement pédoclimatique

%mC

E x G * ; G ; E**

- 31 génotypes 2 ans en TTCR
- * *P*<0,05 et *** *P*<0,001.



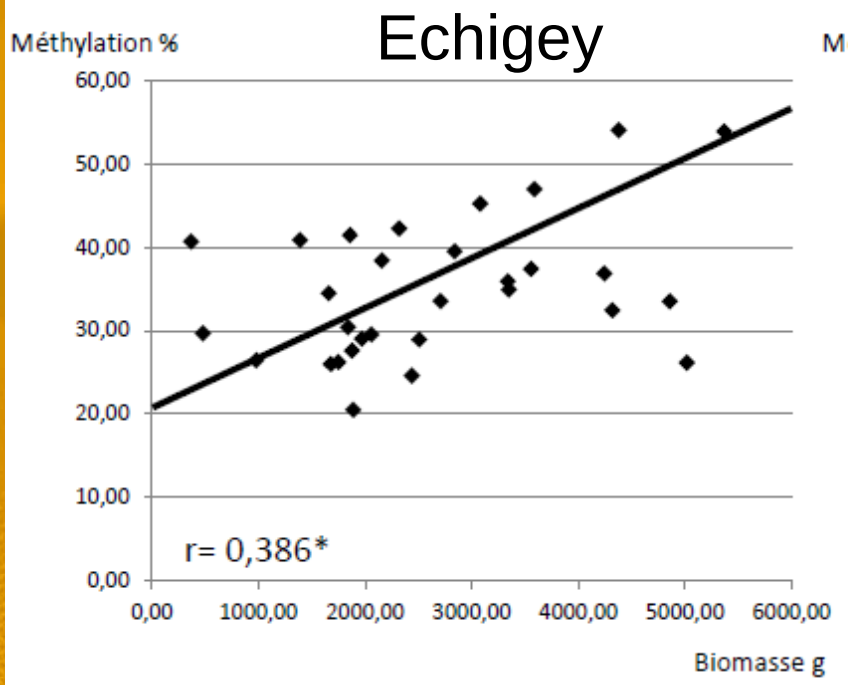
9 Hyperméthylation à St-Cyr /Echigey

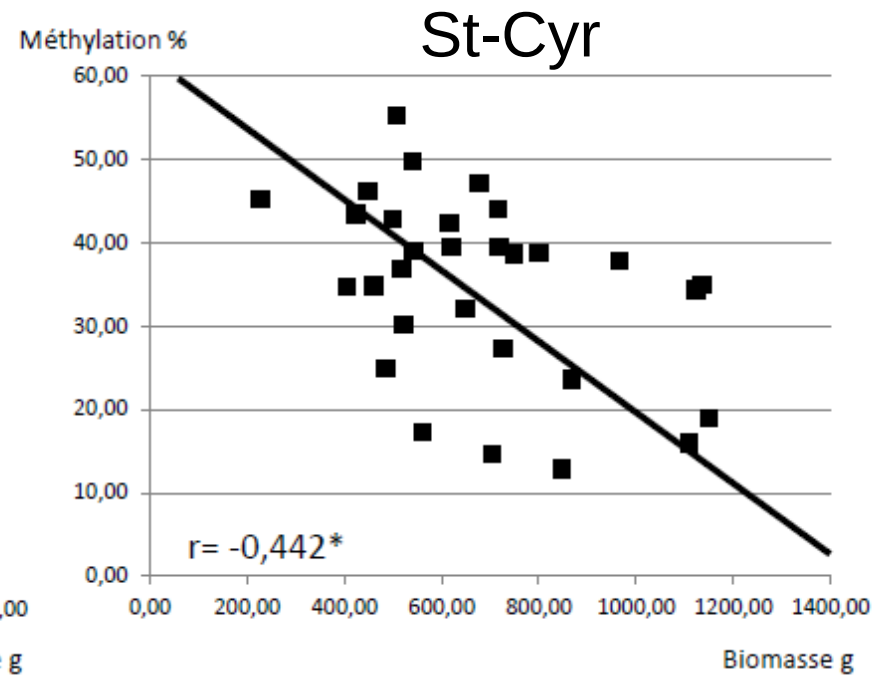
9 Hypométhylation à St-Cyr / Echigey

- Variations génotype-dépendantes de la méthylation ADN en fonction du site pédoclimatique
- En accord avec des études précédentes en serre (Gourcilleau *et al*., 2010; Raj *et al*., 2011)

SYLVABIOM

Corrélations entre la méthylation globale ADN et la production de biomasse sur les 2 sites





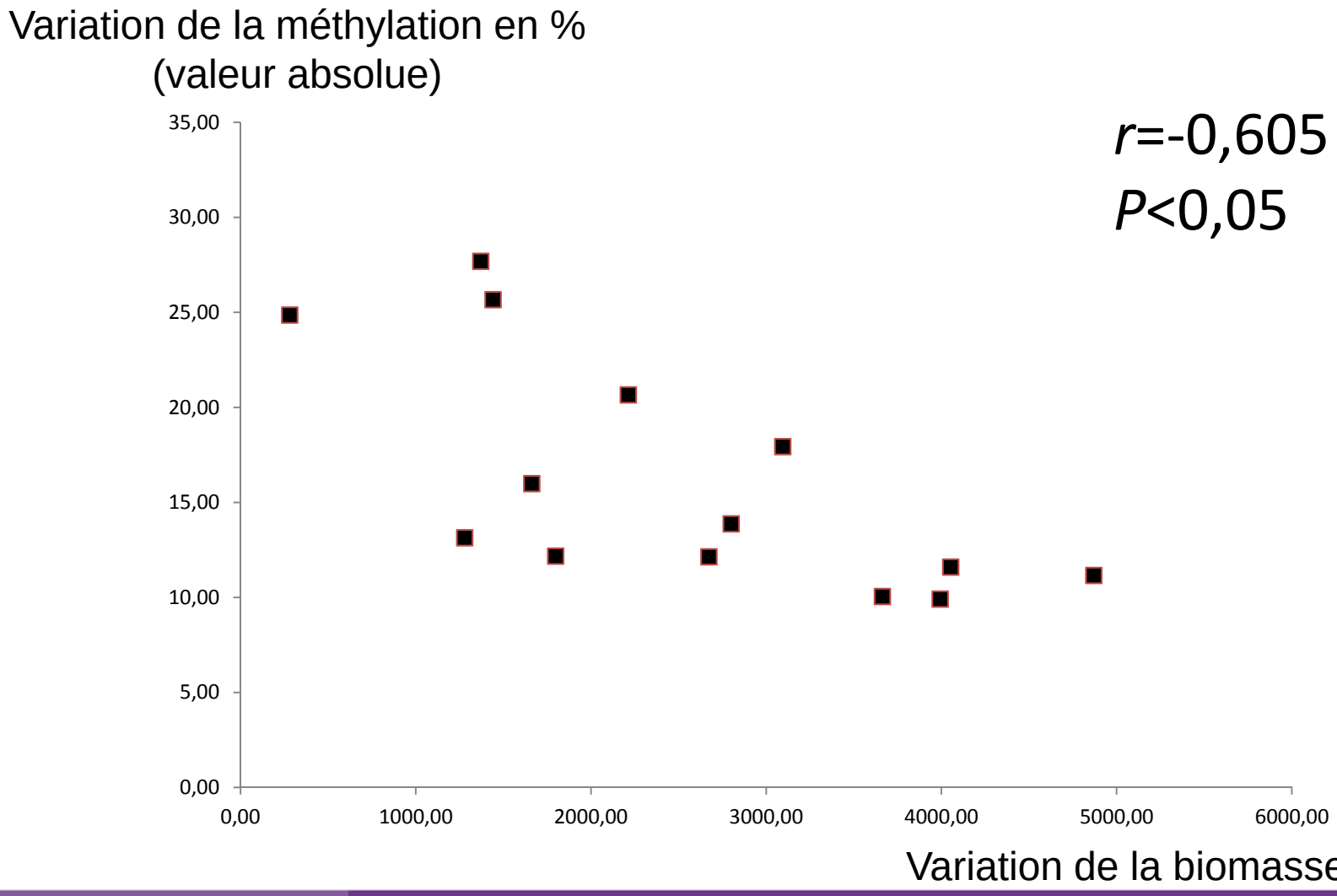
- Corrélations significatives mais positive sur Echigey et négative sur St-Cyr

Ces corrélations ne sont retrouvées sur feuille que sur St-Cyr.

- En accord avec des études précédentes (Gourcilleau *et al*., 2010; Maury/Brignolas, données non publiées) avec corrélation positive en condition hydrique optimale (Echigey) et négative en déficit hydrique (St-Cyr) en serre et pépinière

- Pas une démonstration de relation « cause/conséquence » mais une relation possible

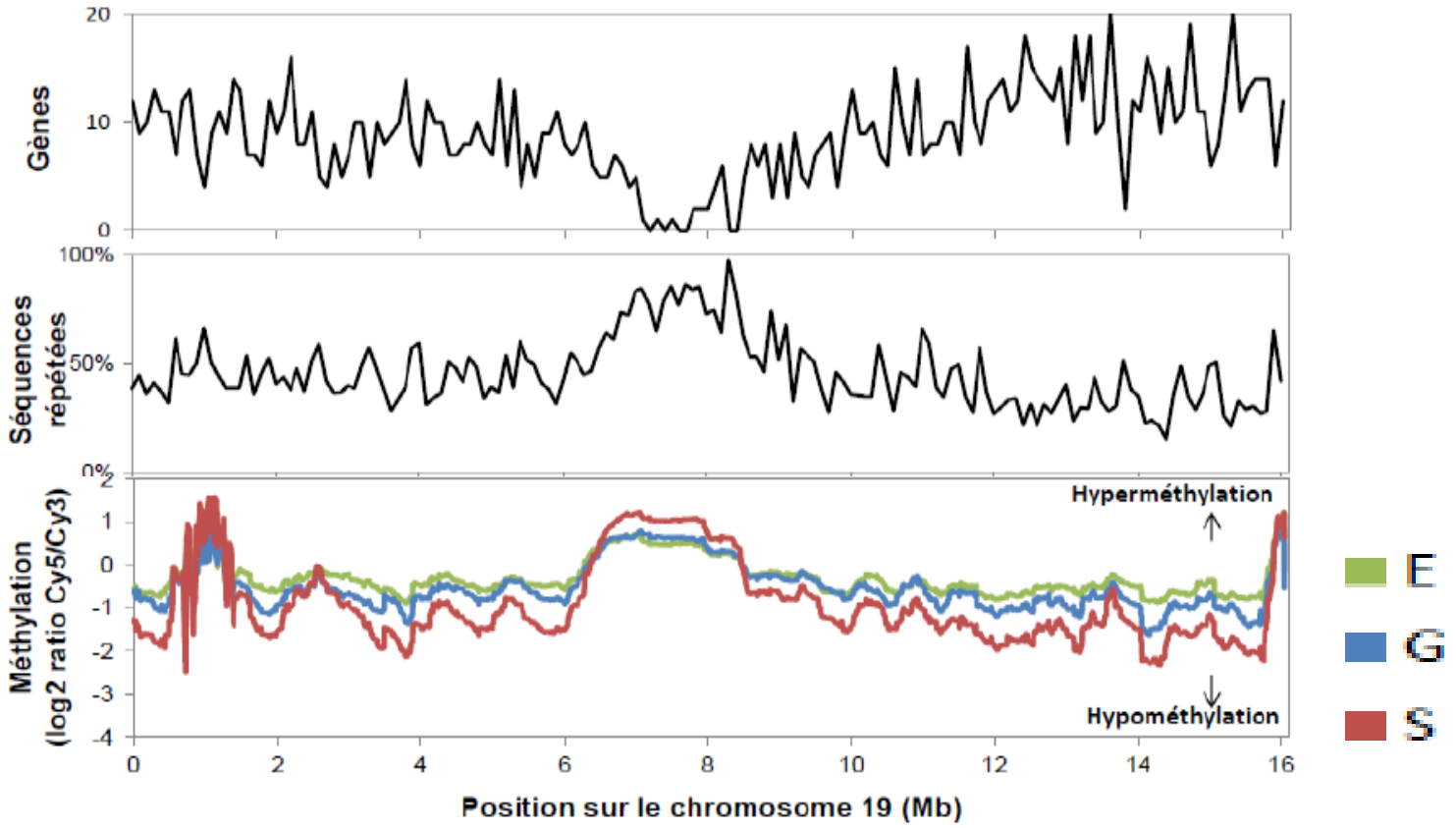
Différentiels de méthylation / biomasse entre Echigey et St-Cyr



r=-0,605

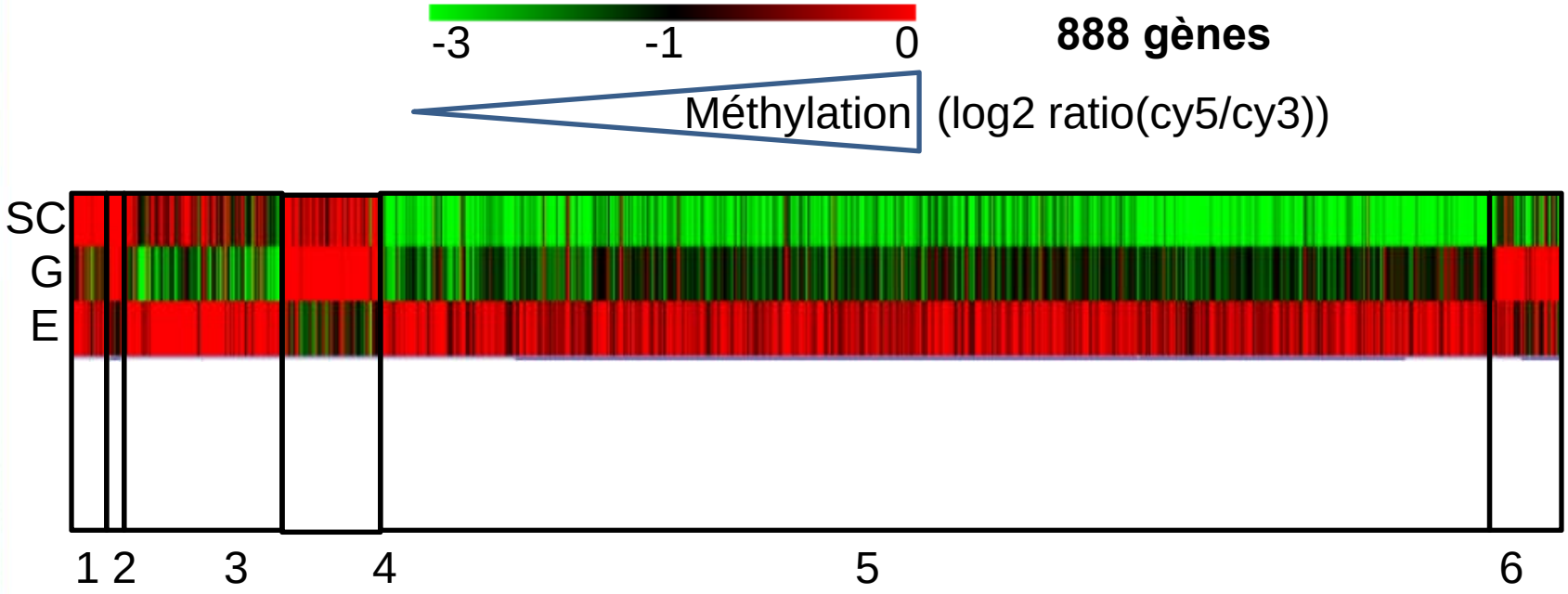
P<0,05

Variations chromosomiques de la méthylation de l'ADN entre les 3 sites



- **Variations le long du chromosome et entre sites avec inversions des classements**
- **Pic notable dans la zone péricentromérique mais aussi dans les gènes**
- **Résultats en accord avec une étude précédente (Lafon-Placette *et al*., in prep)**

‘Clustering’ hiérarchique sur les séquences géniques les plus différentiellement méthylées entre sites



- **6 clusters principaux et le plus important avec les gènes hyperméthylés sur Echigey**

- **Analyse ‘*Gene Ontology*’ indique que ces gènes sont enrichis en régulateurs de transcription et impliquées dans des processus métaboliques.**

1. Piéger la variabilité génétique de la méthylation de l'ADN et ses interactions avec l'environnement pédoclimatique :

- Large gamme de valeurs méthylation globale ADN
- Variations génotype-dépendantes en fonction du site pédoclimatique
- Corrélations entre la méthylation globale ADN et la production de biomasse : la méthylation de l'ADN pourrait être un prédicteur précoce de la production de biomasse pour un environnement donné

2. Identifier des loci cibles des variations de méthylation de l'ADN en fonction de l'environnement pédoclimatique :

- 154 677 sondes différentielles entre sites
- Variations chromosomiques du niveau de méthylation en fonction de l'environnement
- Variations du niveau de méthylation dans des gènes
- La méthylation de l'ADN participerait à l'adaptation locale. La recherche de loci différentiellement méthylés entre sites est un préalable à la recherche de nouveaux marqueurs de sélection

3. Potentiel de production de biomasse totale d'espèces ligneuses à croissance rapide cultivées en futaie à courte révolution.

Objectifs

1. Identifier, au sein des réseaux expérimentaux, les parcelles expérimentales pouvant être assimilées à des plantations d'espèces ligneuses destinées à des fins de production de biomasse

2. Construire des tarifs de volume et de biomasse compartimentés (bois, écorce, tronc, cime et branches) sur échantillons d'arbres abattus pour estimer la production de biomasse à l'échelle de la parcelle entière

3. Comparer les effets du site et de la densité de plantation sur la production en biomasse

4. Evaluer de manière préliminaire les perspectives d'augmentation de la production de biomasse par sélection génétique

Choix des espèces et des sites

Localisation des 15 parcelles retenues pour construction de tarifs biomasse

- *Douglas*
- *Sapin de Vancouver*
- *Epicéa de Sitka*
- *Sequoia sempervirens*
- *Mélèze hybride*
- *Cyprès de Leyland*
- *Cryptomère du Japon*
- *Robinier*

Douglas Darney

Douglas Ecouves

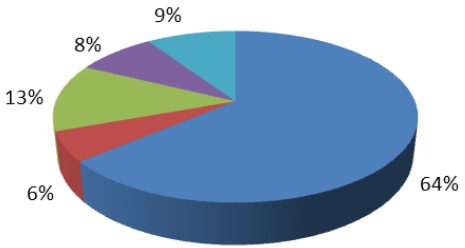
Sapin Vancouver Chaud

Mélèze Ste Geneviève

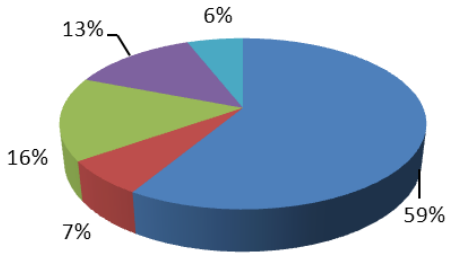
Epicéa de Sitka Peyrat

Ventilation de la biomasse par compartiment

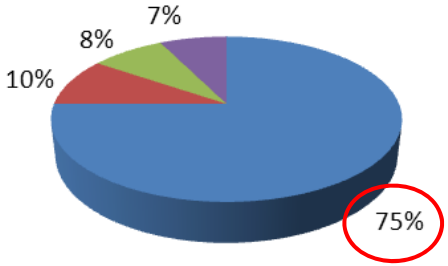
Douglas (21 ans)



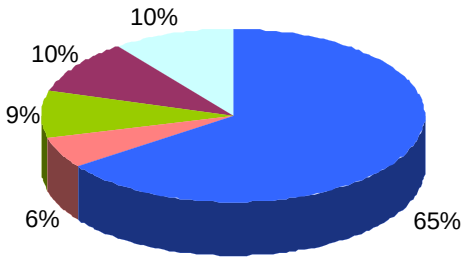
Epicéa de Sitka (30 ans)



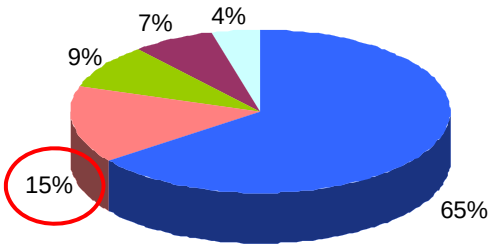
Abies grandis (32 ans)



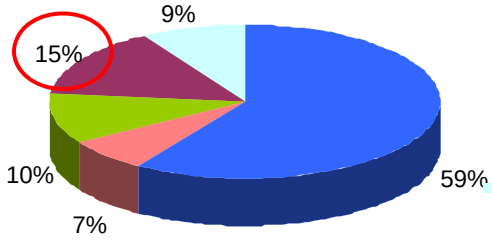
Cupressocyparis (22 ans)

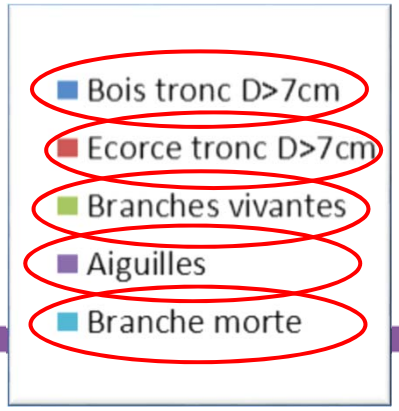


Sequoia sempervirens (28 ans)

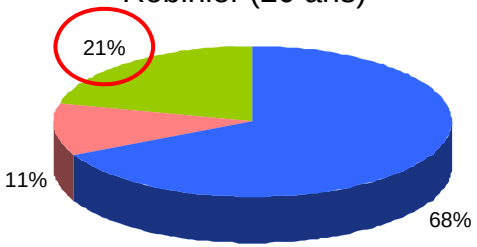


Cryptomeria (24 ans)

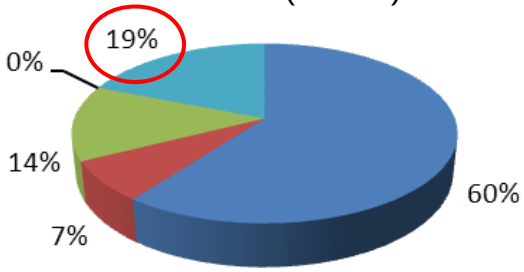




Robinier (20 ans)

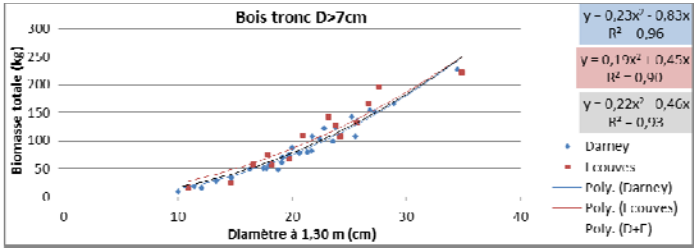


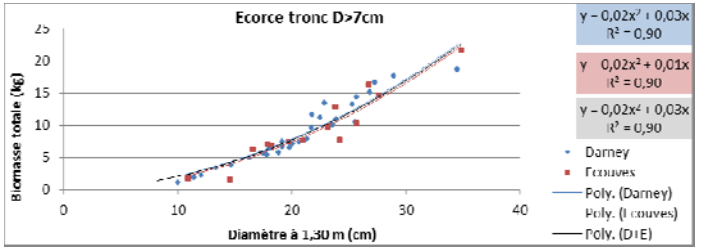
Mélèze (21 ans)

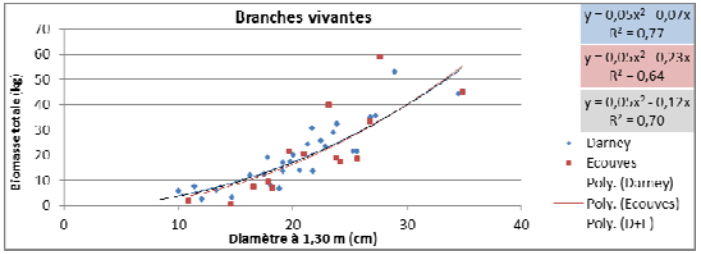


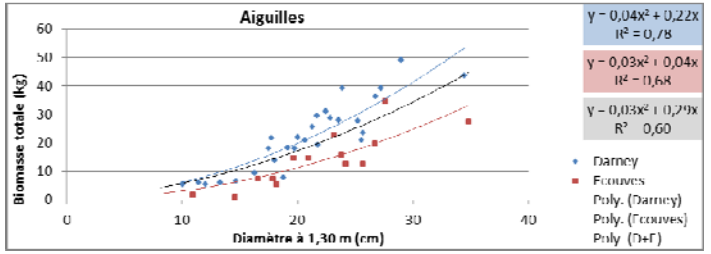
Tarifs biomasse par compartiment

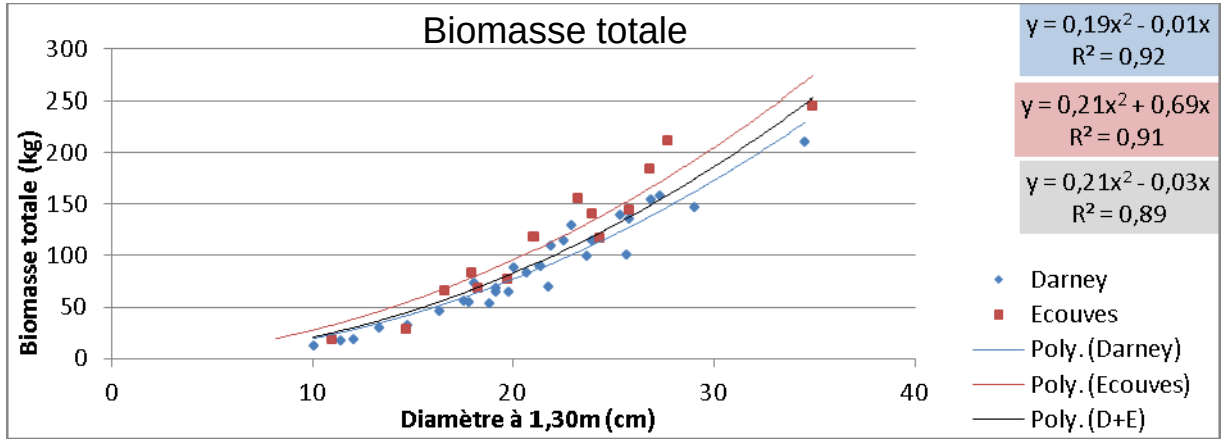
Ex : Douglas (Darney – Ecouves)



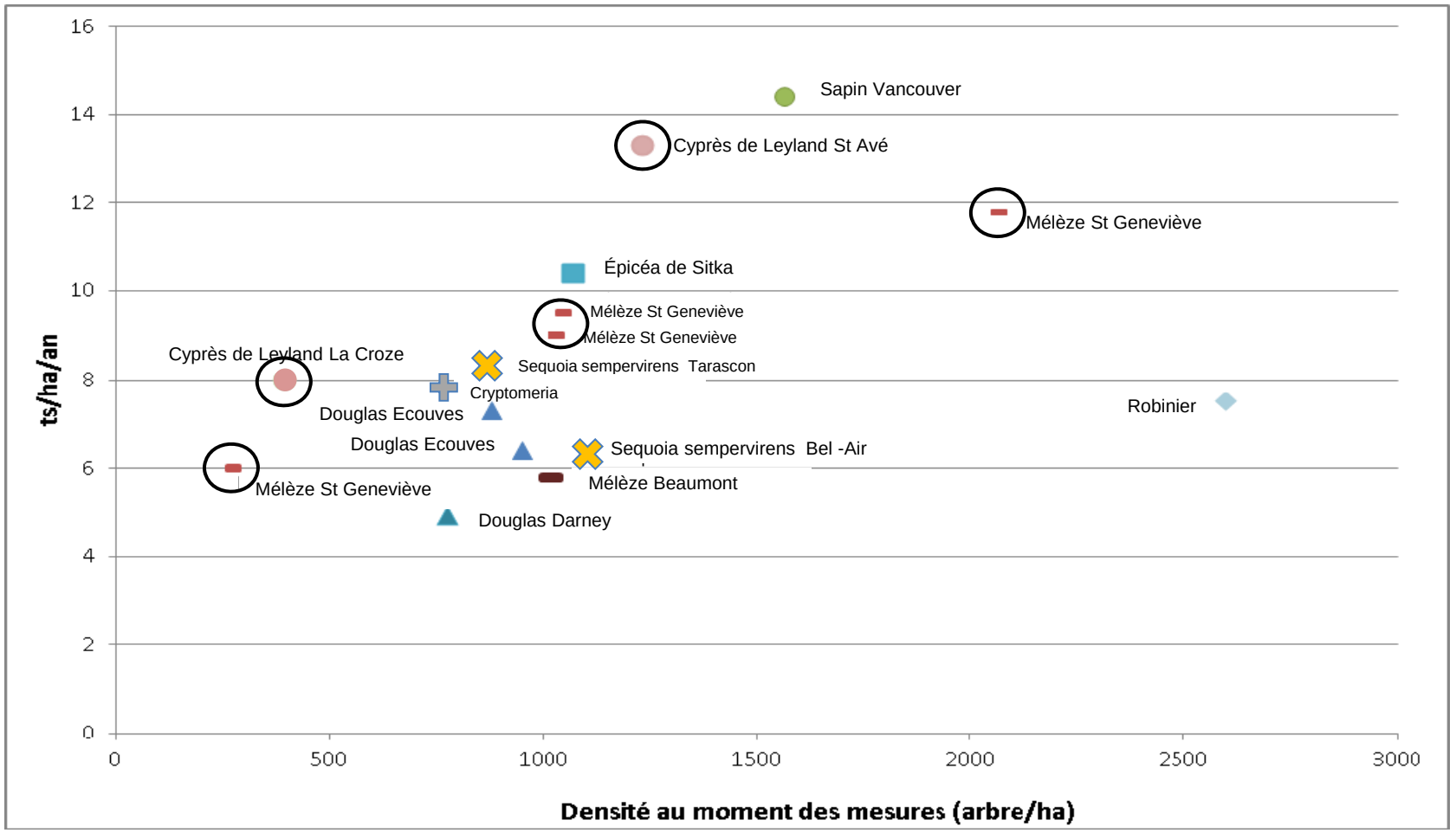








Bilan sur la production de biomasse d'espèces à croissance rapide en FCR



Bilan sur la production de biomasse d'espèces à croissance rapide en FCR

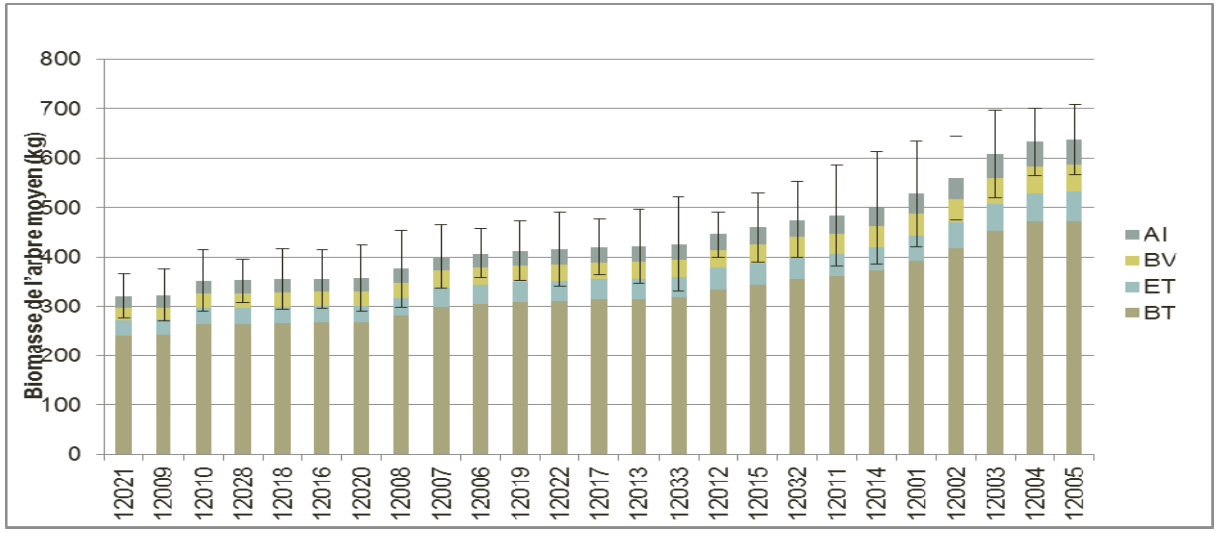
Espèce	Age	Nb tiges/ha	Eclaircie	Production moy. (ts/ha/an)	Production (ICIF)
Douglas	21	1100	Oui	4,5 – 7,3	6 - 10
Robinier	20	2600	Non	7,5	
Cryptomère du Japon	24	1250	Oui	7,8	4 - 9
Sequoia sempervirens	27	1250	Non	6,3 – 8,3	6 - 11
Mélèze	21	278 - 2222	Non	6,0 – 11,8	
Épicéa de Sitka	30	2222	Non	10,4	
Cupressocyparis leylandii	22	1000 – 1235	Non	8,0 - 13,3	8 - 12
Abies grandis	32	1666	Oui	14,4	

*I**CIF** : projet (ONF/Futurol) : **I**tinéraires de **C**ultures **I**ntensives en **F**orêt pour la production de biomasse sur sols acides*

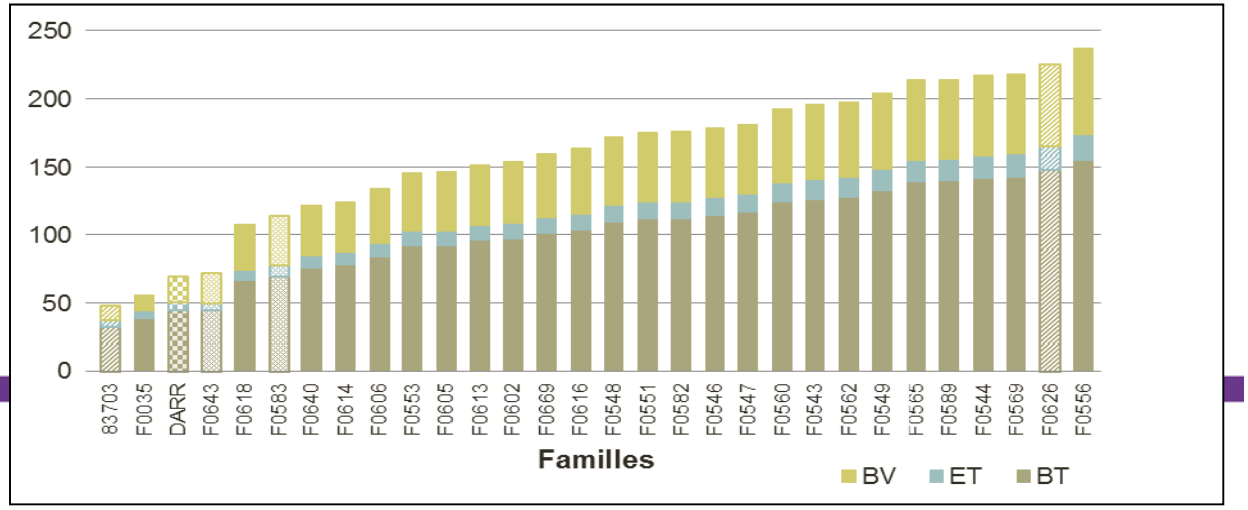
Perspective d'amélioration de la production de biomasse ligneuse en FCR par sélection génétique

Abies grandis ***(32 ans)***
25 provenances de l'aire naturelle

Biomasse de l'arbre moyen (kg)



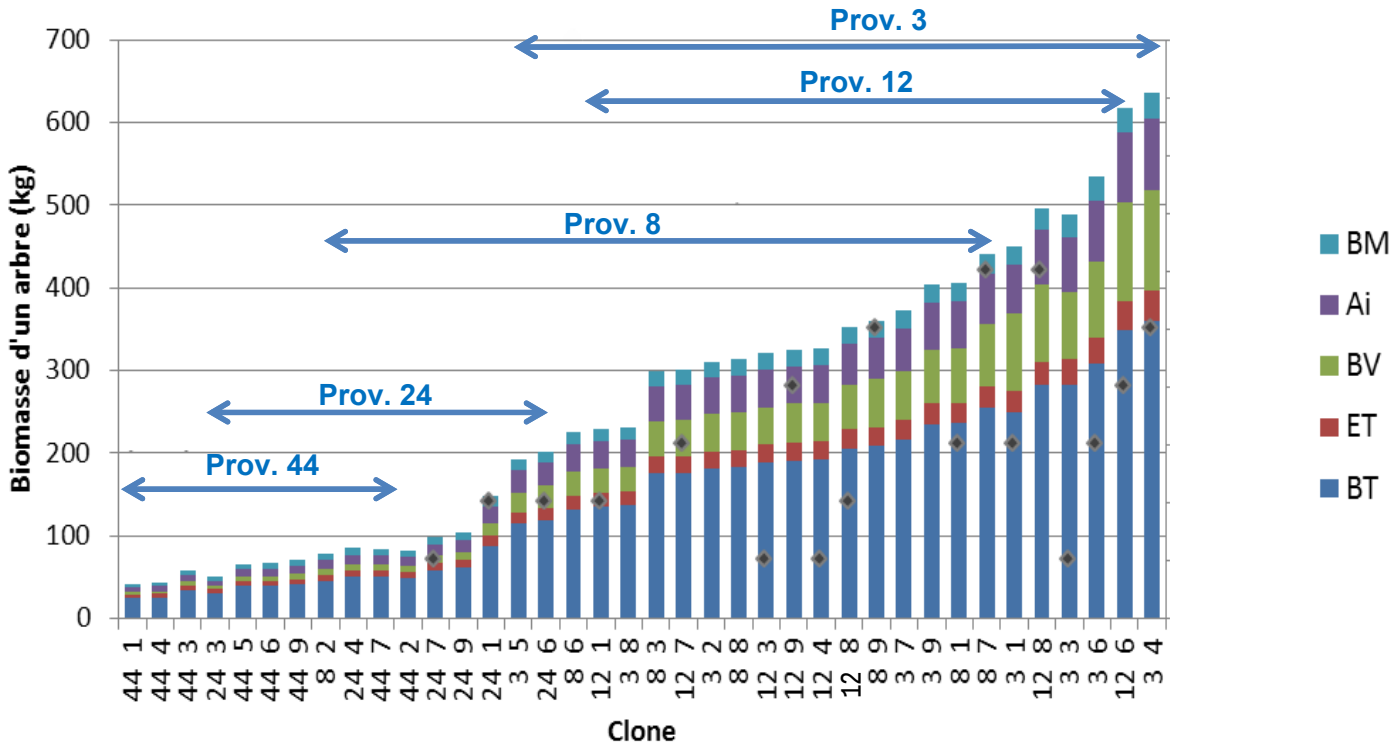
Mélèze hybride **(21 ans)**
28 familles ½ frères et pleins frères



Perspective d'amélioration de la production de biomasse ligneuse en FCR par sélection génétique

Biomasse de l'arbres moyen (kg)

Epicea de Sitka (30 ans)
41 clones



Nouveaux placeaux de référence d'espèces à fort potentiel de production de biomasse

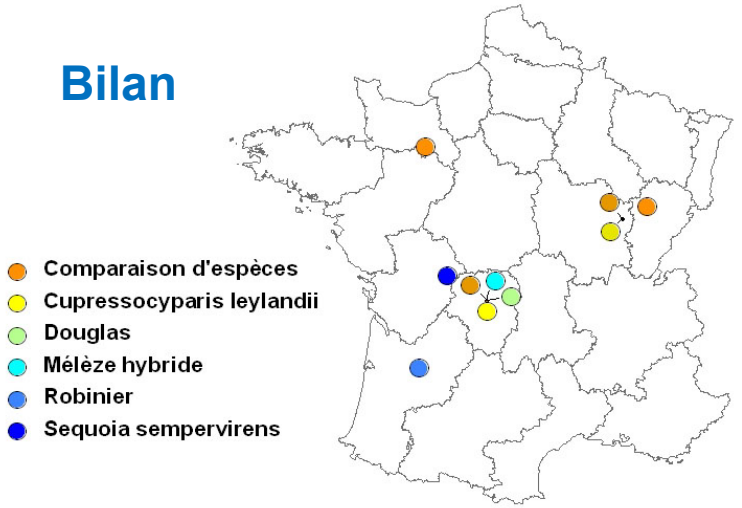
Objectif :

Implanter des dispositifs destinés à comparer :

- pour un contexte pédoclimatique donné, différentes espèces « candidates » entre elles,
- pour une espèce donnée, des systèmes de culture basés sur des densités différentes.

Matériel végétal	Comparaison d'espèces	Comparaison syst. de culture
Robinier	**1600 t/ha**	**2500 & 5000 t/ha**
Douglas	**1600 t/ha**	**1000 & 2000 t/ha**
Mélèze hybride	**1600 t/ha**	**1000 & 2000 t/ha**
Sequoia sempervirens	**1600 t/ha**	**1000 & 2000 t/ha**
Cyprès de Leyland	**1600 t/ha**	**1000 & 2000 t/ha**
Sapin de Vancouver	**1600 t/ha**	
Thuya géant	**1600 t/ha**	
Cryptomère du Japon	**1600 t/ha**	

Bilan



- **4 comparaisons (8 espèces)**
- **6 comparaisons de densité (5 espèces)**

➢ **Surface expérimentale totale : 10,2 ha**

Principales conclusions de l'étude

- Des productions très significatives de biomasse peuvent être espérées par une sélection judicieuse d'espèces forestières (et de génotypes) à croissance rapide conduites en futaie à courte révolution sur des stations peu propices aux cultures agricoles.
- Dans une station adaptée à l'espèce, il est tout à fait envisageable d'atteindre autour de 25 ans une production totale de biomasse (produits d'éclaircies inclus) comprise entre 7 et 10 tonnes sèches par ha et par an.
- Effet très important de la densité du peuplement sur la production de biomasse. Une sylviculture dédiée ou semi-dédiée à la production de biomasse devra plutôt envisager des densités de l'ordre de 1600 à 1800 tiges par ha.
- Espèces à fort potentiel de production de biomasse : Sapin de Vancouver, Cyprès de Leyland et Epicéa de Sitka, Mélèze hybride.
- Espèces décevantes : Douglas et Robinier.

Principales conclusions de l'étude

- Le choix du MFR est un facteur essentiel à prendre en compte pour maximiser la production de biomasse
- Gain génétique de productivité sur la biomasse:
  - *Population : entre + 25 à + 50% selon la diversité génétique considérée*
  - *Famille d'individus « élite » : + 25 à + 50% par rapport à la population selon la diversité génétique considérée*
- Gains à moduler si compromis de sélection avec d'autres caractères
- Les matériels de base pour des variétés à vocation biomasse existent au sein des ressources génétiques de l'INRA et de FCBA

Perspectives

- Pour le moment, il n'est pas culturellement, ni économiquement envisagé de créer des futaies à courte révolution totalement dédiées à la production de biomasse.

- Des scénarios dits "semi-dédiés biomasse" sont néanmoins sérieusement envisagés (notamment par l'ONF), voire mis en œuvre en Aquitaine (Alliance Forêt-Bois)

- Trois inconnues majeures
  - la durabilité des FCR : recours obligatoire à la fertilisation
  - la rentabilité économique : nécessaire augmentation du prix du bois
  - l'acceptabilité sociale et industrielle de ces itinéraires sylvicoles

- Des réponses à moyen terme : le projet FUTUROL / ICIF (ONF) :
  - mise en place d'un essai avec apport de cendres de bois
  - étude économique sur les futaies semi-dédiées biomasse
  - thèse sur l'étude des logiques des acteurs et la mobilisation de la biomasse à l'échelle d'un territoire.

Merci de votre attention