

ÉTUDE DE L'ANCRAGE RACINAIRE DES PEUPLIERS

CONVENTION ECOFOR 2002.06

Rapport final
Octobre 2004

Christophe Drénou

Responsable scientifique
Institut pour le Développement Forestier
Toulouse
7, chemin de la Lacade
31320 Auzeville-Tolosane

Tél. : 05 61 75 45 00
e-mail : CDrenou@association-idf.com

*"Une forêt privée gérée et préservée
par un réseau d'hommes compétents
au service des générations futures"*



TABLE DES MATIERES

- Partie I - Résumé.....	3
- Partie II - Rapport de synthèse	5
- Partie III - Description des sites et des arbres.....	16
- Partie IV - Essais de flexion statique.....	21
<i>IV.1 - Résultats de 2002.....</i>	<i>22</i>
1. Material and Methods.....	22
2. Results	23
<i>IV.2 - Résultats de 2003.....</i>	<i>27</i>
Matériels et méthodes.....	27
Analyse des résultats	29
Conclusion.....	34
References	35
- Partie V - Suivi optique des déformations du tronc et du sol	37
<i>V.1 - Résultats de 2002.....</i>	<i>38</i>
1. Exploitation des 18 essais de flexion.....	38
2. Exploitation des échantillons prélevés sur les systèmes racinaires	45
<i>V.2 – Résultats de 2003</i>	<i>47</i>
1. Exploitation des 21 essais de flexion.....	47
2. Exploitation des échantillons prélevés sur les systèmes racinaires	54
- Partie VI - Etude pédologique des sites.....	55
<i>VI. 1 – Résultats de 2002.....</i>	<i>56</i>
1. Situation des deux fosses pédologiques.....	56
2. Données relevées	56
3. Description rapide des matériaux géologiques et des sols.....	56
4. Les paramètres physiques	56
5. Commentaire et synthèse des résultats	57
<i>VI. 2 – Résultats de 2003.....</i>	<i>60</i>
1. Rappel des investigations conduites en avril 2002 dans le domaine de Bariteau, à Beuxes (86)	60
2. Rappel des investigations conduites en mai 2003 à Verdun-sur-Garonne (82)	60
3. Interprétation des résultats	60

4. Enseignements méthodologiques et théoriques	62
5. Essai de restitution de la variété des cas étudiés sous la forme d'une typologie simplifiée pouvant servir de support à la modélisation.....	62
- Partie VII - Analyse architecturale des systèmes racinaires	71
<i>VII.1 – Résultats de 2002.....</i>	<i>72</i>
1. Méthode.....	72
2. Répartition des racines selon l'ordre, l'âge et l'inclinaison.....	74
3. Répartition des racines d'ordre 2	76
4. Le diamètre des racines d'ordre 2.....	78
5. Les racines verticales d'ordre 3.....	80
6. Synthèse	82
<i>VII.2 - Résultats de 2003</i>	<i>83</i>
1. Matériel et sites d'étude.....	83
2. Méthode.....	83
3. Cartographies des profils racinaires (figures 1 à 4)	83
4. Analyse des diamètres (tableaux 1 et 2)	84
5. Résumé du développement racinaire des 4 cultivars (figure n° 5)	85
- Partie VIII - Modélisation de l'ancrage (2004)	96
<i>VIII.1 – Analyse numérique de I 214 et de Dorskamp.....</i>	<i>97</i>
Introduction	97
Modélisation numérique par la MEF	97
Résultats	101
Conclusion.....	111
<i>VIII.2 Modélisation de portraits robots.....</i>	<i>116</i>
Matériel et méthodes.....	116
Résultats	116
Discussion	117

- PARTIE I -

RESUME

Une étude de l'ancrage racinaire des peupliers a été entreprise afin de comprendre la diversité inter cultivars des dégâts enregistrés après la tempête de fin 1999. Deux cultivars interaméricains, Raspalje et Beaupré, ont été étudiés en Indre et Loire sur un sol sablo-argileux (avec une contrainte à l'enracinement liée à de l'argile lourde en profondeur). Deux cultivars euraméricains, I214 et Dorskamp, ont été étudiés dans le Tarn et Garonne sur un sol limono-sableux sans contrainte pour l'enracinement. Pour chaque cultivar, trois classes d'âges ont été retenues (2-4 ans, 7-9 ans, 13-16 ans), avec trois arbres par classe, soit neuf individus par cultivar.

Sur chaque site, l'étude s'est déroulée en plusieurs étapes : flexion statique des arbres et suivi optique des déformations du tronc et des sols, analyse texturale et mécanique des sols dans des fosses pédologiques, extraction du compartiment central des systèmes racinaires avec une pelle hydraulique, mise à nu des racines par projection d'air comprimé, mesures des paramètres architecturaux, réalisation de portraits-robots des systèmes racinaires, modélisation enfin de l'ancrage à l'aide de la méthode des éléments finis.

Ces approches complémentaires ont permis de comparer les cultivars. Ainsi, dans un sol sans contrainte, Raspalje a l'ancrage le plus performant. I214 est le plus faiblement ancré. Beaupré est proche de I214. Enfin, l'ancrage de Dorskamp, performant jusqu'à huit ans, ne fait que s'affaiblir avec l'âge.

- PARTIE II -

RAPPORT DE SYNTHÈSE

- *Récit de trois années de recherches*

Le choix des cultivars et des sites n'a pu se faire qu'en réalisant un compromis entre les exigences scientifiques et les contraintes pratiques. En effet, nous sommes parti avec la volonté de comparer des cultivars interaméricains et des cultivars euraméricains, sur des sols différents et à différents stades de développement. Même si le peuplier est un matériel d'étude présentant de nombreux avantages (arbres clonés, installés en plançons, adultes dès l'âge de 15 ans), il a fallu composer avec plusieurs difficultés pratiques : trouver des propriétaires acceptant le déracinement de plusieurs de leurs peupliers, trouver des sites géographiques pas trop éloignés les uns des autres, trouver sur des sols identiques les différents stades de développement de chaque cultivar, limiter le nombre d'arbres à analyser de façon à respecter les délais du projet, enfin choisir des cultivars représentant le mieux possible le comportement des interaméricains face au vent d'une part, et celui des euraméricains d'autre part. Nos recherches ont été grandement facilitées par l'existence du réseau d'expérimentations « peupliers » coordonné par l'IDF. Finalement, deux sites ont été retenus (Indre et Loire, Tarn et Garonne), le premier sur sol Sablo-argileux (avec une contrainte à l'enracinement liée à de l'argile lourde en profondeur), le deuxième sur sol Limono-sableux sans contrainte pour l'enracinement. Malheureusement, nous n'avons pas pu trouver les mêmes cultivars sur ces deux sites. Raspalje et Beaupré (interaméricains) ont été choisis sur le site d'Indre et Loire : ils représentent bien à eux deux la diversité du comportement des interaméricains (Raspalje tolère les milieux secs et a une croissance régulière, tandis que Beaupré supporte les inondations et se caractérise par une forte croissance initiale). Notons que Beaupré, qui a longtemps été très planté, n'est plus subventionné aujourd'hui pour des raisons de risques phytosanitaires (rouille). En ce qui concerne les euraméricains, les représentants choisis ont été I214 et Dorskamp, respectivement premier et deuxième cultivar les plus plantés en France. Pour chaque cultivar, trois classes d'âges ont été retenues (2ans, 7 ans et 13 ans), et notre étude s'est limitée à trois arbres par classe, soit 9 individus par cultivar. Ce nombre est faible, mais nous avons pensé que le caractère cloné du matériel compenserait cette insuffisance (la suite nous montrera qu'en réalité il y a une très forte hétérogénéité de l'enracinement même entre peupliers clonés).

Au cours de la première année, un gros travail méthodologique a fait l'objet d'un DEA au sein du Laboratoire des Solides de Poitiers (LMS). Il s'agissait en effet d'appliquer pour la première fois la méthode de suivi des marqueurs optiques à de grands objets tels que les arbres soumis à des essais de flexions du tronc. Nous avons été surpris par la richesse des informations apportées par cette méthode. L'intervalle de temps séparant le début de la flexion du tronc et le soulèvement du sol est enregistré, la hauteur et l'intensité de la courbure du tronc sont calculées, enfin, la profondeur du centre de rotation de la galette racines + sol est estimée. Aussi, dès la première campagne d'essais sur le terrain, le LMS pouvait se prononcer sur l'efficacité comparée de l'encastrement racinaire de Beaupré et de Raspalje, ce dernier ayant, *a priori*, l'ancrage le plus performant. L'extraction des systèmes racinaires à la pelle hydraulique, puis la mise à nu des racines par projection d'air comprimé, même si le procédé est très grossier (nombreuses racines cassées restant dans le sol), nous a permis d'aller dans le même sens que celui du LMS : racines profondes plus nombreuses et plus grosses pour Raspalje, racines obliques plus nombreuses chez Raspalje également. Par ailleurs, le fait d'avoir analysé des systèmes racinaires à des âges différents nous a permis de retracer la dynamique de mise en place des racines ligneuses chez le peuplier. Nous nous sommes aperçus par exemple, qu'à deux ans les racines sont trop fines pour jouer un rôle quelconque dans l'ancrage au sol, et qu'à sept ans, les différentes catégories de racines ligneuses sont toutes en place. **En résumé, dès la fin de la première année, on comprenait**

pourquoi le cultivar Raspalje, avec un point de rotation plus enfoncé, un tronc plus rigide, des racines plus grosses, plus profondes et obliques, avait été beaucoup plus vulnérable au volis (22%) que Beaupré (8 %) lors de la tempête de fin 1999.

Notons que la méthode du suivi optique des déformations a également été appliquée pour caractériser la résistance mécanique d'échantillons de bois racinaire, mais qu'aucune différence n'a pu être constatée entre les deux cultivars interaméricains.

Au cours de la deuxième année, nous avons répété notre approche pluridisciplinaire sur le deuxième site pour les cultivars I214 et Dorskamp. Nous avons cependant apporté des améliorations méthodologiques compte tenu de l'expérience de l'année passée. Ainsi, nous avons décidé, étant donné l'efficacité de la méthode des marqueurs optiques, de conduire la flexion des troncs jusqu'à la ruine pour tous les arbres. Nous avons choisi de supprimer la classe d'âge des deux ans et de la remplacer par celle des quatre ans. Dès la phase de terrain, et avant même toute analyse, nous avons noté des comportements différents entre les deux euraméricains. Lorsqu'on tire sur les I214, ils se couchent tous (8 individus sur 9). Chez les Dorskamp, les arbres se cassent tous jusqu'à l'âge de 8 ans (6 individus sur 6), tandis qu'ils se couchent à 16 ans (3 individus sur 3). Notons que les sols, après analyse pédologique dans des fosses, se sont révélés rigoureusement identiques sur tout le site et dans le même état au moment des essais. L'étude du déplacement des marqueurs optiques a mis en évidence l'ancrage racinaire plus performant du Dorskamp par rapport au Beaupré, mais n'est pas parvenue à expliquer le changement de comportement des Dorskamp après l'âge de 8 ans. Déception également pour le calcul des moments appliqués requis pour déraciner ou briser les arbres, puisque aucune différence significative n'est apparue (équipe LRBB). En revanche, l'analyse architecturale des systèmes racinaires nous a orienté vers une piste de recherche intéressante. En effet, si il est vrai que toutes les catégories de racines ligneuses se mettent en place vers 7 ans (confirmation des résultats de l'année passée), c'est après que les racines grossissent fortement (certaines peuvent avoir un diamètre de plus de 40 cm), mais ce grossissement ne concerne pas toutes les racines. Ainsi, chez le cultivar I214, ce sont les racines superficielles horizontales qui grossissent le plus. Pour les Dorskamp, les structures privilégiées par le grossissement sont les racines obliques. Il est frappant de remarquer à quel point la croissance secondaire (en diamètre) des racines est déterminée génétiquement (sols identiques sans contrainte, âges identiques, densités de plantation et populiculture identiques). En conséquence, s'agissant du cultivar Dorskamp, l'architecture racinaire se métamorphose entre 8 et 16 ans. A 8 ans, le plançon donne naissance à deux types d'axes d'ordre 2 (A2 horizontaux et obliques) et à deux types également d'ordre 3 (A3 verticaux et obliques). A 16 ans, seuls les axes obliques et verticaux sont de gros diamètre et les racines horizontales superficielles finissent par disparaître. **En résumé, en fin de deuxième année, nous disposons de trois portraits robots d'architecture racinaire. Type 1 : A2 horizontaux (I214 et Beaupré), type 2 : A2 obliques (Dorskamp à 16 ans) et type 3 : A2 horizontaux et obliques (Raspalje et Dorskamp jusqu'à 8 ans).**

La troisième et dernière année, consacrée à la modélisation par la méthode des éléments finis (équipe LRBB), devait être la clé de voûte de l'étude. Toutes les mesures réalisées sur le terrain ont été orientées, dès le départ, vers cette ultime étape. Etant données les différences pédologiques entre les deux sites, nous nous sommes en effet reportés vers la modélisation pour pouvoir s'affranchir du facteur sol, et comparer ainsi les quatre cultivars entre eux. Malgré les nombreuses concertations entre les différentes équipes de l'étude, il a été fortement regrettable de constater qu'aucun paramètre pédologique mesuré sur le terrain n'ait été intégré dans les modèles (des mesures spécifiques de résistance des sols au cisaillement et de résistance à la pénétration avaient pourtant été réalisées sur les deux sites, dans 6 fosses). De la même façon, il a été décevant de se rendre compte que la base de données des architectures racinaires de type « MTG » préconisée par le LRBB, et particulièrement

laborieuse à utiliser sur le terrain, n'a eu qu'une utilité toute relative au moment de la modélisation. Quoi qu'il en soit, il a été décidé de reprendre la modélisation en tenant compte des portraits robots définis en 2003, et non pas des systèmes racinaires réels mesurés sur le terrain. Les résultats obtenus, même s'ils dépendent du type de modèle utilisé (deux modèles ont été mis au point), permettent d'éclaircir le problème de l'ancrage des Dorskamp. Ils montrent en effet que lorsqu'il n'y a que des racines obliques (même grosses) insérées sur le plançon, la stabilité de l'arbre est très faible (cas des Dorskamp de 16 ans). En revanche, lorsque de grosses racines superficielles horizontales disposées symétriquement autour du collet se rajoutent à des racines obliques plus profondes, l'ancrage au sol est très performant (cas des Raspalje et des Dorskamp à 8 ans). **En résumé, la modélisation a permis de comparer l'ancrage racinaire des quatre cultivars sur un sol théorique à dominante argileuse. Il confirme les analyses de terrain. Raspalje a l'ancrage le plus performant. I214 est le plus faiblement ancré. Beaupré est proche de I214. L'ancrage de Dorskamp, performant jusqu'à 8 ans, s'affaiblit avec l'âge.**

- *Y a t'il eu un travail d'équipe ?*

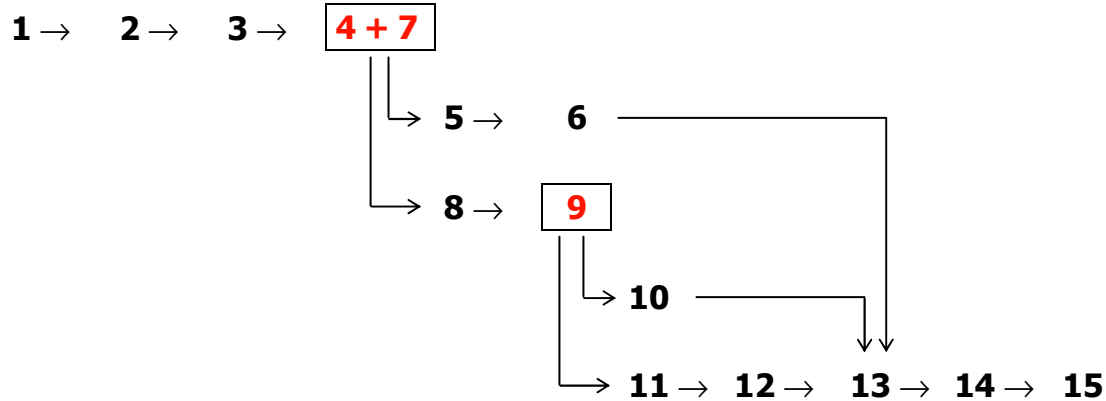
Ce projet comportait quatre thèmes de travail : pédologie, biomécanique, photomécanique, architecture et modélisation. Trois organismes se sont associés pour la première fois : l'IDF, Institut pour le Développement Forestier (C. Drénou, E. Paillassa, F. Charnet, L. Dupuy), le LMS, Laboratoire de Mécanique des Solides (F. Brémand, E. Robin) et le LRBB, Laboratoire de Rhéologie du Bois de Bordeaux (A. Stokes, Th. Fourcaud).

Dès le départ un fil conducteur a été tracé sous la forme d'un organigramme des tâches et des liens entre elles (voir ci-dessous).

Sept réunions ont eu lieu entre les trois organismes : 1 lancement, 3 bilans annuels, 2 terrains, 1 intermédiaire. Ces réunions ont véritablement joué un rôle de moteur pour ce projet, et trois années ne sont pas de trop pour apprendre à travailler ensemble. Il y a eu enrichissement mutuel des trois organismes. Soulignons le regard neuf apporté par le LMS, laboratoire habituellement étranger à la forêt.

N°	LIBELLE DES TACHES	RESPONSABLE
1	ETABLISSEMENT D'UN CONTRAT GIP-ECOFOR / IDF / LRBB / LMS	TH. FORMERY
2	CHOISIR LES SITES D'ETUDE ET LES CULTIVARS	E. PAILLASSA
3	ESSAIS DE FLEXION STATIQUE	A. STOKES
4	OUVERTURE D'UNE FOSSE PEDOLOGIQUE PAR SITE ET DESCRIPTION DES PROFILS	F. CHARNET
5	ETUDE MECANIQUE DU SOL <i>IN-SITU</i> (CISAILLEMENT, PENETROMETRIE)	F. CHARNET F. BREMAND
6	ETUDE MECANIQUE DU SOL EN LABO (ESSAI TRI-AXIAL)	F. BREMAND
7	ARRACHAGE DES ARBRES	C. DRENOU
8	MISE A NU DES SYSTEMES RACINAIRES	C. DRENOU
9	DESCRIPTION QUALITATIVE DES SYSTEMES RACINAIRES	C. DRENOU
10	MESURES DES SYSTEMES RACINAIRES (METHODE MTG)	C. DRENOU L. DUPUY
11	PRELEVEMENT D'EPROUVETTES PAR CATEGORIES DE RACINES	F. BREMAND C. DRENOU
12	ANALYSE PHOTOMECANIQUE DES EPROUVETTES (MODULES D'ELASTICITE + RUPTURE)	F. BREMAND
13	SIMULATION NUMERIQUE A L'AIDE DE PLAXIS (MAILLAGE DES RACINES + MAILLAGE DES SOLS)	TH. FOURCAUD
14	CONFRONTATION ENTRE SIMULATION ET DEGATS REELS ENREGISTRES APRES LA TEMPETE DE FIN 1999	E. PAILLASSA
15	SYNTHESE - RAPPORT FINAL	C. DRENOU

Liens entre les tâches :



- *Les réalisations correspondent-elles aux engagements initiaux ?*

La seule tâche qui n'a pas été réalisée correspond aux tests mécaniques des sols en laboratoire. Des contacts ont été pris avec le Laboratoire de Géotechnique des Ponts et Chaussées d'Angers, mais ce projet a été abandonné, le rapport entre le coût de ces tests et leur intérêt n'ayant pas paru intéressant (plus de 5 000 euros pour 3 essais triaxiaux).

- *Qu'apporte cette étude dans le contexte bibliographique de l'ancrage racinaire ?*

Les systèmes racinaires de peupliers sont tous de type « Pivotant » (en raison de la plantation en plançon), mais n'ont pas le même ancrage, d'où l'importance capitale des axes d'ordre 2. Ceux-ci étant linéaires (pas de fourche réitérative), c'est leur direction de croissance et leur symétrie par rapport au pivot qui interviennent dans l'ancrage au sol. Pour qu'un ancrage soit performant, il faut à la fois de grosses et longues racines horizontales pour déplacer le point de rotation au-delà de l'axe passant par le pivot (ici, le plançon), et des racines obliques pour dissiper les forces du vent dans le sol et abaisser le centre de rotation. Par conséquent, des racines de gros diamètres ne suffisent pas pour assurer un ancrage performant (Dorskamp à 16 ans), et un point de rotation profond ne suffit pas pour assurer une bonne stabilité (importance du décalage de ce point par rapport au pivot).

Notons enfin que l'ancrage racinaire évolue au cours du développement de l'arbre en raison de la croissance secondaire (Dorskamp).

- *Les résultats répondent-ils aux questions posées ?*

Question n°1 : l'ancrage racinaire des peupliers interaméricains est-il plus performant que celui des peupliers euraméricains ? Nos résultats ne valident pas cette hypothèse.

Question n°2 : quelle est la part du sol, de la résistance du bois racinaire et de celle de l'architecture sur l'ancrage ? On sait maintenant que pour les peupliers le bois racinaire est particulièrement fragile. Sa résistance ne semble pas varier entre cultivars et doit être négligeable dans l'ancrage au sol. Comme nous l'avons déjà dit, les caractéristiques mécaniques des sols mesurés sur le terrain n'ont pas été prises en compte dans la modélisation. Celle-ci a été effectuée dans un sol unique et théorique à base d'argile. Nous ne pouvons donc pas répondre à la question 2.

SYNOPSIS DES RESULTATS OBTENUS

		Raspalje (R) (Interam.)	Beaupré (B) (Interam.)	Dorskamp (D) (Euram.)	I214 (I) (Euram)	Conclusions (> : meilleur ancrage)
% de dégâts post-tempête à l'échelle nationale	% de penchés	6	14	14	0	Pas de conclusion
	% de chablis	18	10	44	71	B > R > D > I
	% de volis	22	8	12	5	R > D > B > I
Essais de flexion statique avec un câble	Moment appliqué maximal requis pour déraciner ou briser	Pas de différences significatives entre les moments calculés				Classement impossible
Suivi photomécanique de la flexion des troncs	Soulèvement du sol	Faible	Important	Faible	Important	R > B sur le site 1 D > I sur le site 2
	Courbure du tronc	Forte courbure vers 4 à 6 m. de hauteur	Courbure située entre 1 et 2 m.	Augmentation croissante d'une courbure en dessous de 1,50 m.	Légère courbure passagère	Par extrapolation : D=R > I=B
	Profondeur estimé du centre de rotation	-58 cm	-35 cm	-48 cm	-33 cm	
Analyse de l'architecture des racines	Direction de croissance des A2	Horizontale (H) et obliques (O)	H	A 8 ans : H + O A 16 ans : O	H	On distingue trois types d'architectures :
	Correspondance avec les portraits robots utilisés en modélisation	Type 3-6 (T3-6) ou T3-2	T1 ou T1-4	8 ans : T3-4 16 ans : T2-2	T1 ou T1-4	Type 1 : B et I Type 2 : D (16ans) Type 3 : R et D (8 ans)
Modélisation des portraits robots	Profondeur des axes de rotation	-60 cm	-45 cm	8 ans : -75 cm 16 ans : -90 cm	-45 cm	R=D8ans > I=B > D16 ans
	Volume de sol retenu	Les T3 retiennent le plus grand vol.	Large, peu profond	Etroit et profond à 16 ans	Large peu profond	
	Réponse force/déplacement	Par ordre décroissant des forces nécessaires au déplacement T3-6 > T3-4 = T3-2 > T1=T1-4 > T2-2				
Conclusion générale	Raspalje a l'ancrage le plus performant. I214 est le plus faiblement ancré. Beaupré est proche de I214. L'ancrage de Dorskamp, performant jusqu'à 8 ans, s'affaiblit rapidement avec l'âge.					

Fig. 1 :Synthèse pour les chablis

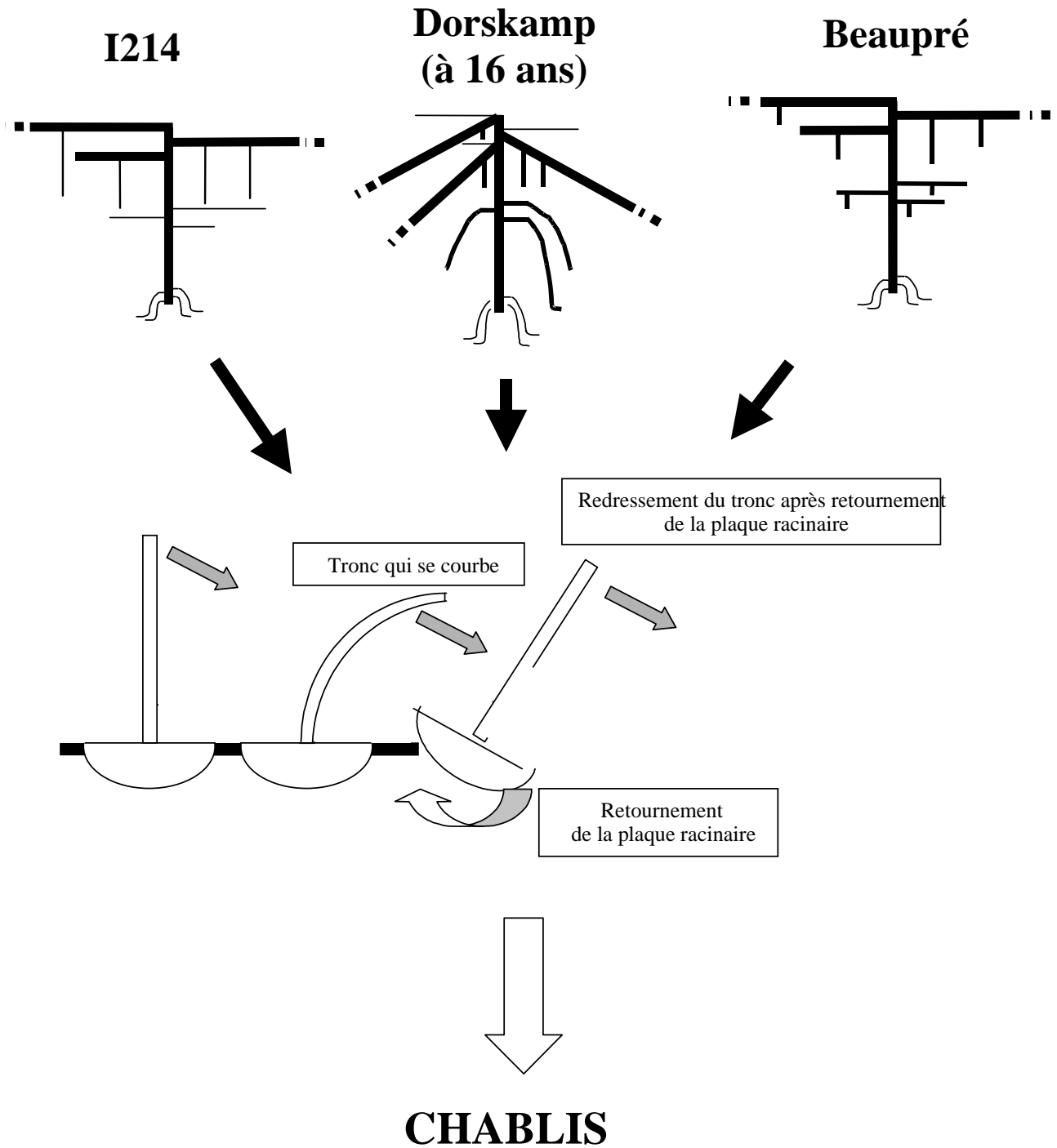
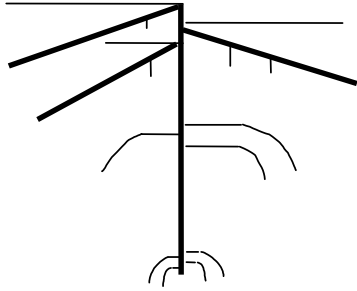
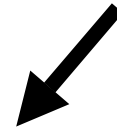
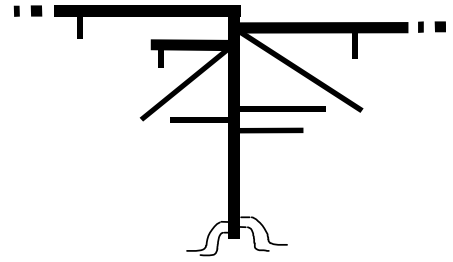


Fig. 2 : Synthèse pour les volis

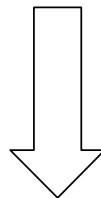
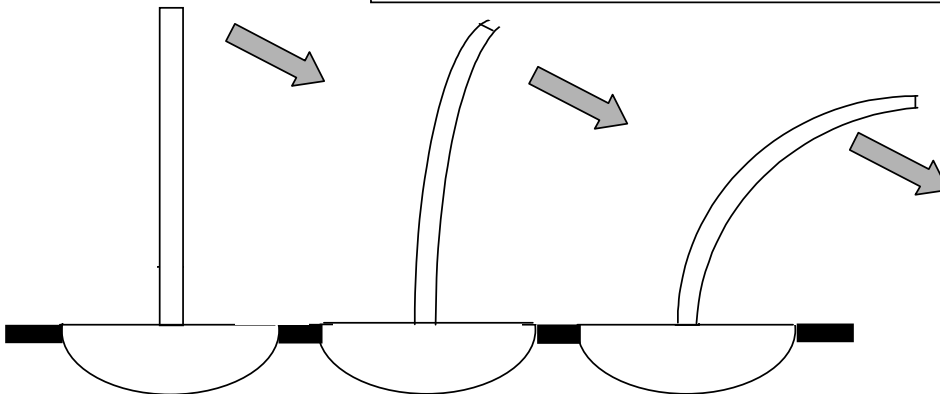
Dorskamp
(à 4 et 8 ans)



Raspalje



La courbure du tronc ne cesse d'augmenter
au cours de l'essai de flexion



VOLIS

- *Quelles sont les retombées pour les populteurs ?*

Certaines idées reçues sont à nuancer. Ainsi, dire que les systèmes racinaires de peupliers sont de type « traçant » est sans doute vrai pour certains cultivars comme le I214, mais ne l'est plus lorsqu'on considère le Dorskamp ou le Raspalje. Affirmer que le développement racinaire est « opportuniste » est très réducteur. Cette étude montre en effet à quel point les facteurs endogènes sont déterminants (voir I214 et Dorskamp au même âge sur un sol identique). « Les racines de peupliers déstabilisent les berges », peut-on lire dans certains manuels techniques. Une fois encore, tout dépend du cultivar. Une autre croyance concerne le binage, qui, pour certains populteurs, ferait « plonger » les racines en profondeur. En réalité, nos observations montrent que les racines superficielles coupées restent en surface, elles fourchent à proximité du collet et grossissent peu. Enfin, l'hypothèse d'un clivage entre les interaméricains et les euraméricains en terme d'ancrage ne se vérifie pas.

Contrairement aux idées précédentes, certaines affirmations restent toujours fondées. Ainsi, les I214 réputés pour être très sensibles au chablis, ont effectivement un mauvais ancrage racinaire. Il est souvent conseillé d'installer profondément les plançons pour réduire les stress hydriques. Notre étude montre que c'est aussi un bon moyen de produire rapidement des racines en profondeur et d'accroître ainsi la stabilité.

Les résultats de ce projet peuvent également déboucher sur des conseils pratiques. Par exemple, il convient d'éviter les blessures sur les racines superficielles en préférant le désherbage chimique ou le gyrobroyeur aux disques profonds. A maturité, les risques de volis étant les plus élevés pour le Raspalje, il sera sage de prévoir l'exploitation de ce cultivar en premier.

- *Et si c'était à refaire ? (bilan méthodologique)*

Nous ferions réaliser les analyses mécaniques des sols en labo (en prévoyant un budget conséquent).

Nous multiplierions les suivis photomécaniques, spécialement mis au point pour ce projet. Avant d'extraire mécaniquement les systèmes racinaires, nous dégagerions manuellement les racines superficielles sur toute leur longueur.

Nous ne réutiliserions pas la méthode « MTG » pour décrire les architectures (trop complexe, niveau d'analyse trop fin).

Nous modéliserions des portraits robots, et non des systèmes racinaires réels.

Nous étudierions les arbres, individu par individu, sans essayer de faire des statistiques. Nous nous sommes en effet rendu compte que l'étude des particularités de chaque individu pouvait apporter de nombreuses informations, contrairement aux analyses statistiques qui se font souvent en aveugle. Il est apparu illusoire de vouloir simuler ou imiter la complexité d'un ancrage racinaire par l'intermédiaire d'une approche statistique. En revanche, extraire du réel des éléments simplifiés, comme nos « portraits-robots », nous a fourni une matière première particulièrement riche pour la réflexion.

- *Quelles suites possibles pour cette étude ?*

Deux prolongations directes de ce projet peuvent s'envisager :

- l'utilisation de la méthode photomécanique pour réaliser des diagnostics de tenue mécanique sur des arbres remarquables (en ville, dans les parcs...),
- la modélisation de l'ancrage d'autres essences, après une recherche préalable des portraits-robots des systèmes racinaires .

- *Quelles sont les publications et communications issues de ce projet ?*

PUBLICATIONS

- CHARNET F., 2003 - L'enracinement des arbres et les propriétés physiques des sols. Forêt-entreprise, n° 154, IDF édit., Paris, p. 37-43.
- DRENOU Ch. , 2002 - Etude de l'ancrage racinaire des peupliers. Poster réalisé pour le GIP-ECOFOR.
- DUPRAT M., 2004 - Etude de l'architecture racinaire de deux cultivars de peuplier : Dorskamp et I214. Rapport de stage pour l'obtention du BTS gestion forestière, LEGTA de Bazas, 80 p.
- DUPUY L., DRENOU Ch., FOURCAUD Th., 2003 - Sols, racines et ancrage des arbres forestiers. Forêt-entreprise, n° 153, IDF édit., Paris, p. 39-43.
- DUPUY L., FOURCAUD T., LAC P., STOKES A.,- Numerical analysis of tree root anchorage : application to poplar, submitted to Int.J. Num. Anal. Meth. Geomech.
- MAITROT M., 2002 – Etude de l'architecture racinaire de deux cultivars de peuplier : Raspalje et Beaupré. Rapport de stage pour l'obtention du BTS gestion forestière, EAP d'Annecy – Poisy, 43 p.
- OBOROCEANU D., 2003 – Analyse expérimentale de l'ancrage du système racinaire des peupliers par méthode optique, rapport de stage, Univ. Poitiers, LMS, 82 p.
- ROBIN E., 2002 – Contribution à l'étude de l'ancrage des peupliers : détermination expérimentale de l'évolution de la courbure du tronc et des paramètres mécaniques du système racinaire par méthodes optiques, DEA, Univ. Poitiers, LMS, 136 p.
- ROBIN E., DUPRE J. Ch., BREMAND F., 2003 - La photomécanique au service de la mécanique des arbres. Forêt-entreprise, n° 153, IDF édit., Paris, p. 44-46.
- STOKES A., SALIN F., DUPUY L., CUCCHI V., 2004 - Que savons-nous de la biomécanique racinaire ? Forêt-entreprise, n° 156, IDF édit., Paris, p. 23-27

COMMUNICATIONS

- BREMAND F., ROBIN E., 2003 - Technique optique de mesure de la déformée d'arbres *in situ*. Séminaire de Biomécanique de l'Arbre, INRA Réseau Ecophysiologie de l'Arbre, Bordeaux, 13-14 mai 2003
- BREQUE C., ROBIN E., DUMOUSSEAUD J. F., VALLE V., DUPRE J. C., BREMAND F., 2003 - Mesure de déplacements et de déformations sur les matériaux du vivant par la méthode sans contact du suivi de marqueurs. Journée d'extensométrie 2003 à ENPC Champs sur Marne, 17 et 18 septembre 2003.
- DRENOU CH., 2003 - L'architecture racinaire des peupliers. Journée du Centre d'Etudes Techniques Forestières de Gascogne, 15 avril 2003, Marciac.
- DRENOU CH., 2003 - L'architecture racinaire des peupliers. Journée du Centre d'Etudes Techniques Forestières Garonnais, 4 juin 2003, Verdun sur Garonne.
- DRENOU CH., 2004 - Etude de l'ancrage racinaire des peupliers. Journée du Groupe de Travail National "Peupliers", 21 janvier 2004, Paris.
- ROBIN E., DUPRE J. C., BREMAND F., 2003 - Détermination de la déformée du tronc et des caractéristiques mécaniques des racines de peupliers par méthodes optiques. 15ème Congrès français de Mécanique, 1-5 septembre 2003, Nice, pp 183-190.
- ROBIN E., HESSER F., DUPRE J. C., BREMAND F., 2004 - Étude *in situ* de la déformée de troncs de peupliers lors d'essais de flexion. Colloque Photomécanique 2004, École des Mines d'Albi-Carmaux, 4- 6 mai 2004, pp 209-216.

FORMATIONS

- DRENOU CH., 2003 - L'ancrage racinaire des peupliers. Journée de formation pour l'association "Arbres et Paysages d'Autan", 17 avril 2003, Ayguevives.
- DRENOU CH. 2004 - L'ancrage racinaire des peupliers. Session de formation organisée par l'IDF intitulée "Les racines, face cachée des arbres", 16 et 17 mars 2004, Paris.

- *Remerciements*

Nous tenons à remercier Monsieur Meese, propriétaire du site étudié en Indre et Loire, ainsi que Monsieur Bournaud, propriétaire de la peupleraie dans le Tarn et Garonne. Nos remerciements vont également aux techniciens et stagiaires suivants : M. Maitrot, M. Duprat, J. Paulus, M. Chartier, J. Rosa, P. Blanquet, H. Lataillade et H. Bignalet.
Merci enfin à : L. Dupuy (IDF), S. Berthier (LRBB), J.C. Dupré, F. Hesser et V. Valle (LMS)

- PARTIE III -

**DESCRIPTION DES SITES ET DES
ARBRES**

(Christophe Drénou, Eric Paillassa, IDF)

L'étude s'est déroulée dans deux peupleraies. Une près de Chinon (37), l'autre à proximité de Verdun sur Garonne (82). Les mesures de terrain ont été faites en avril 2002 près de Chinon, et en mai 2003 à Verdun sur garonne. Si le premier site présente deux principales contraintes d'enracinement (nappe peu profonde et horizon argileux lourd vers 90 cm), le deuxième site offre en revanche un sol optimal pour le développement des peupliers (voir tableau 1).

Quatre cultivars ont été étudiés. Beaupré et Raspalje, deux interaméricains ayant les mêmes parents et donc très proches entre eux. Deux euraméricains d'origine génétique différente : le Dorskamp (sélection hollandaise) et le I 214 (sélection italienne) qui représentent à eux deux les cultivars les plus plantés actuellement (tableau 2).

Au total, 35 arbres ont été fléchis à l'aide d'un tire-fort, puis abattus et déracinés. Pour chaque cultivar, 3 classes d'âges sont représentées (2 à 4 ans, 7 à 9 ans et de 13 à 16 ans), ce qui permet de recouvrir la totalité du développement des peupliers en plantation (tableau 3). Les diamètres et hauteurs des arbres sélectionnés correspondent aux moyennes nationales mesurées au sein du réseau "peupliers" suivi par l'I.D.F.

Au niveau des dégâts recensés après la tempête de fin 1999, on a constaté très peu d'arbres cassés chez Beaupré (8 %) et I 214 (5 %), tandis que les déracinements sont les plus fréquents chez Dorskamp (44 %) et I 214 (71 %) (tableau 2).

Tableau n°1

CARACTERISTIQUES DES DEUX SITES D'EXPERIMENTATION

	Peupleraie n°1 (étude 2002)	Peupleraie n°2 (étude 2003)
Appellation	Bariteau	St Pierre
Localisation	Indre et Loire (37) près de Chinon	Tarn et Garonne (82) près de Verdun sur Garonne
Coordonnées Lambert zone III	X = 436,5 Y = 2 237	X = 512 Y = 3 169
Géomorphologie	Rive droite du Chavenay	Rive gauche de la Garonne, lit majeur
Altitude	37 m	100 m
Précipitations moyennes	760 mm / an	660 mm / an
Température moyenne annuelle	10,9 °C	12,6 °C
Type de nappe phréatique	moyenne (étiage entre 1 et 2,5 m)	profonde (étiage entre 2,5 et 5 m)
Matériau géologique parental	substrat sédimentaire constitué des sables et marnes vertes du Cénomaniens	alluvions modernes du lit majeur, graves situées entre 1,6 et 3 m de profondeur
Texture du sol	limono-argilo-sableuse ou sablo-argileuse en surface, horizon argileux lourd vers 85-90 cm	limono-argilo-sableuse devenant limono-sableuse (entre 80 et 130 cm) puis sableuse (vers 130 cm)

Tableau n°2

CARACTERISTIQUES DES CULTIVARS ETUDIES AU NIVEAU NATIONAL

	Beaupré	Raspalje	Dorskamp	I 214
Origine	Interaméricains Mère : Fritzi Pauky (<i>P. trichocarpa</i>) Père : S.1-173 (<i>P. deltoides</i> , Iowa x <i>P. deltoides</i> , Missouri)		Euraméricain sélectionné en 1952 en Hollande <i>P. deltoides</i> (Mississippi) x <i>P. nigra</i> (vallée du Pô)	Euraméricain sélectionné en 1929 en Italie <i>P. deltoides</i> x <i>P. nigra</i> (vallée du Pô)
Sexe	Femelle	Femelle	Mâle	Femelle
Sensibilité phototropisme	Faible	Faible	Importante	Très importante
Représentation nationale	Arrêt total actuellement	Se développe surtout depuis 3-4 ans dans toute la France	2 ^{ème} cultivar le plus planté actuellement	1 ^{er} cultivar le plus planté actuellement
Besoin en eau	Moyen	Faible (redoute les inondations printanières)	Moyen	Important (nappe nécessaire)
Réaction / argile	Peut supporter des taux d'argile élevés	Préfère les sols sans trop d'argile	Supporte les taux d'argile élevés	Préfère les sols sans trop d'argile
% dégâts après la tempête de fin 1999 sur station riche au niveau national	32	46	70	76
% chablis	10	18	44	71
% cassés	8	22	12	5
% penchés	14	6	14	0

Tableau n°3

CARACTERISTIQUES DENDROMETRIQUES DES PEUPLIERS ETUDIES

CULTIVARS	Beaupré			Raspalje			I 214			Dorskamp		
Sites d'étude + densité de plantation	Bariteau, 7m x 7m			Bariteau, 7m x 7m			St Pierre, 7m x 7m			St Pierre, 7m x 7m		
Ages (années)	2	7	13	2	7	13	4	9	14	4	8	16
Nombre d'arbres déracinés	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3
Nombre d'arbres fléchis jusqu'à la ruine	1	1	1	1	1	1	3	6	3	3	3	3
Diamètre du tronc à 1,30 (m)	0,06	0,24	0,37	0,06	0,28	0,42	0,16	0,34	0,35	0,19	0,32	0,45
Hauteur totale (m)	7,2	18,5	27,7	7,0	20,2	31,8	13,7	26,5	25,3	14,5	22,0	33,5
Diamètre vertical de la plus grosse racine (cm)	1	10,83	30,66	1	17,66	35,00	7,00	26,67	24,67	17,67	20,33	41,68

- PARTIE IV -

ESSAIS DE FLEXION STATIQUE

IV.1 - Résultats de 2002

(Alexia Stokes, LRBB)

Le texte de cette partie a été rédigé en anglais, en vue d'un article à soumettre pour une revue internationale, après intégration des résultats prévus en 2003.

1. Material and Methods

1.1. Winching tests

In order to determine how anchorage strength changes with age in two clones of Poplar, trees aged 2, 7 and 13 years old were selected from a stand situated at Chinon, north-west France. Two clones were chosen, Beaupré and Raspalje, hybrids issued from the North American species *P. trichocarpa* Torr. And Gray \times *P. deltoides* Bartr ex Marsh. Trees had been planted at a density of 200 ha⁻¹. Three trees per age and per clone were selected for winching studies (Table 1).

Trees were winched sideways in March 2002, using a Hit-Trac 1.6T automated winch attached by a cable to a height approximating that of the centre of the stem (Fig. 1). The height of cable attachment was noted. An inclinometer was attached to the base of the stem and also at the point of cable attachment, in order to measure stem deflection during tree pulling. A load cell (Scaime 20kN or 50kN, depending on tree size) was fixed between the winch and a nearby anchoring tree. Both the inclinometers and the load cell were connected to a datalogging system, measuring data every 5 sec (Ahlborn). Trees were winched to the east, in the direction of the prevailing wind. Only one tree from every block of three was winched until failure, as a detailed analysis of root architecture was to be carried out on the entire and unbroken root systems. Therefore, two trees were winched sideways, almost to the point of anchorage failure, and then trees were allowed to return the vertical.

Tree height and height to the base of the crown were measured, along with DBH and distance between pulled and anchoring trees. After felling, stem taper was calculated by measuring trunk circumference every metre the length of the stem. In order to determine stem density and biomass, a 1m long log was removed from the centre of the trunk and weighed, and the circumference measured at each end. For uprooted trees, fresh foliar biomass (branches and leaves) was also measured. Samples of soil were taken from around the root system after pulling, and immediately weighed. These samples were then taken back to the laboratory and dried for 5 days at 100°C, and percentage humidity of soil calculated.

1.2. Data analysis

The applied bending moment (M_B) in Nm, was calculated from the height of cable attachment, force applied and angle of pull [Equ. 1].

$$M_B = F \cdot \cos\sigma \cdot L \quad [\text{Equ. 1}]$$

Where: F = Force applied (N), $\cos\sigma$ the angle between the cable and the anchoring tree (Fig. 1) and L was the height of the cable attachment (m). In order to take into account the M_B due to the weight of the stem and crown, the following equations need to be carried out [Equ. 2, 3]:

$$M_B \text{ due to crown biomass} = \text{crown biomass} \times 9.81 \times \text{height of centre of gravity of crown} \times \sin(\alpha) \quad [\text{Equ. 2}]$$

Where: α is the displacement angle of the stem from the vertical (Fig. 1)

M_B due to stem biomass = Σ Mass stem increments x 9.81x height of centre of gravity of each stem increment from ground level x $\sin(\alpha)$ [Equ. 3]

The applied M_B underestimates the overall M_B by about 5- 20% depending on tree size, and is more important in young trees, where stem curvature is higher (Peltola et al 1999).

In order to determine stem elasticity and bending stiffness, Modulus of Elasticity (E) and the second moment of area (I) will be calculated.

$$E = F \cdot \cos \sigma \cdot h^3 / (3 \cdot d \cdot I) \quad [\text{Equ. 4}]$$

Where: h = height of cable (m), d = displacement distance of stem (m) and $I = \pi D^4 / 64$ where D is diameter of the trunk.

Bending stiffness can be calculated using EI.

Correlations were calculated between M_B , E and EI and various physical characteristics of trees e.g. stem DBH, height, density and volume. Analysis of variance was used to determine differences in M_B between clones at different ages. Means are \pm standard error.

2. Results

Raspalje clones were usually taller with a larger DBH than Beaupré, and this difference was significant in trees aged 7 and 13 years old (Table 1). In trees that were winched until failure, the youngest trees broke at the stem base, whereas two 7 year old trees were uprooted, and one failed in the stem at a height of 2m. Both 13 year old trees were uprooted. M_B increased significantly with tree age (Fig. 2), and a mean M_B of 0.42 ± 0.07 kNm was needed to cause failure in 2 year old trees, whereas 17.8 ± 2.7 kNm was needed in 7 year old trees and 136.8 ± 14.8 kNm in the oldest trees. When differences in M_B were examined between the two clones, it was found that 13 year old Raspalje clones were more resistant to winching than Beaupré, however, this difference was not quite significant (Fig. 2). M_B was similar between clones at ages 2 and 7 years.

M_B regressed significantly with stem diameter in both Beaupré and Raspalje clones (Fig. 3). Regressions on stem biomass, density height and taper still need to be carried out, along with an interpretation of the results bearing in mind soil characteristics and humidity.

Modulus of Elasticity differed significantly depending on age, although no differences were found between clones due to the high variability in trees (Fig. 4). A regression on stem density needs to be carried out.

Further analysis is needed to determine if the greater M_B required to cause failure in Raspalje is an artefact of tree size only. If more trees of these two clones could be winched over, these results could be verified. As no significant differences in E were found between clones, it would appear that differences in M_B are probably due to tree size or form. Values for E were similar to those found for conifers, which vary between 7700 and 12000MPa (Bruchert et al 1999, Peltola et al 1999, Stokes 1999) and *Betula pendula* at 11000MPa. All data will need to be analysed further and interpreted with regards to root architecture (measured by IDF) and tree form, and thus cannot be discussed in detail at this point of the project.

TABLE 1. DENDROMETRICAL CHARACTERISTICS OF TWO POPLAR CLONES: BEAUPRÉ AND RASPALJE, AT DIFFERENT AGES. DIFFERENCES IN CHARACTERISTICS BETWEEN CLONES WERE TESTED WHERE N>3. MEANS ARE ± STANDARD ERROR.

Characteristics	Age (years)					
	2		7		13	
Clone	Beaupré	Raspalje	Beaupré	Raspalje	Beaupré	Raspalje
DBH (m)	0.05± 0.002	0.06± 0.003	0.24±0.007 **	0.28±0.003 **	0.37±0.005 ***	0.42±0.000 ***
Total stem height (m)	7.15 ± 0.35	7.03 ± 0.33	18.5± 0.29*	20.2± 0.42*	28.2	32.6
Height of stem to first live branch (m)	3.37 ± 0.27	4.14 ± 0.34	7.3 ± 0.06	7.3 ± 0.34	8.2	10.15
Estimated stem biomass (kg) (n=1)	10.5	13				
Fresh weight of crown (kg) (n=1)	1.0	2.0	73.9	88.5	355	364

* = significant to P < 0.05, ** = significant to P < 0.01, *** = significant to P < 0.001

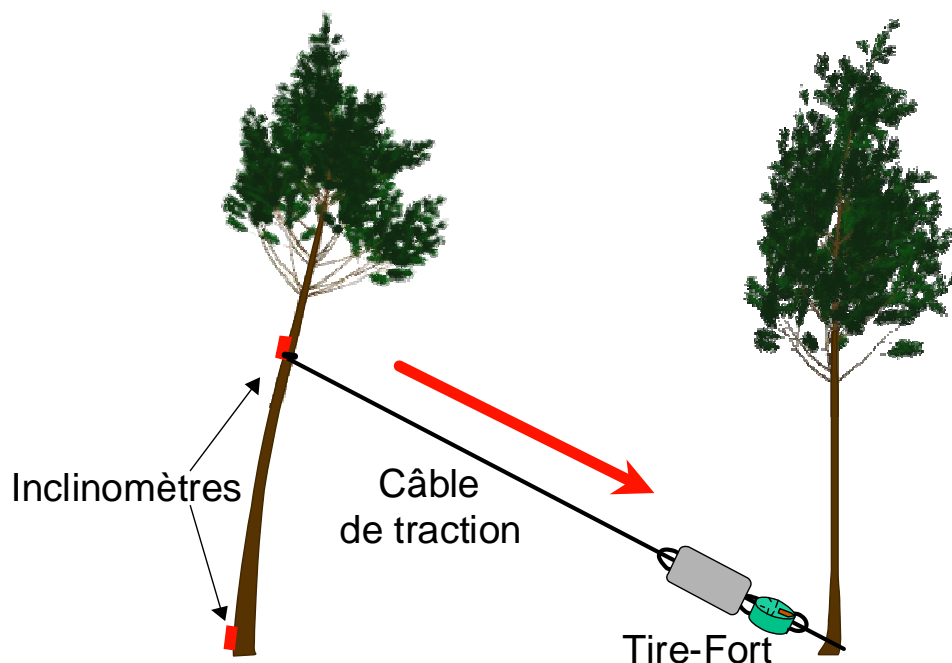


Fig. 1. Trees were winched sideways using an automated winch. Stem deflection was measured using inclinometers attached at the base of the tree at the point of cable attachment. Force was measured using a load cell fixed between the winch and a neighbouring tree. Image courtesy of T. Fourcaud (CIRAD).

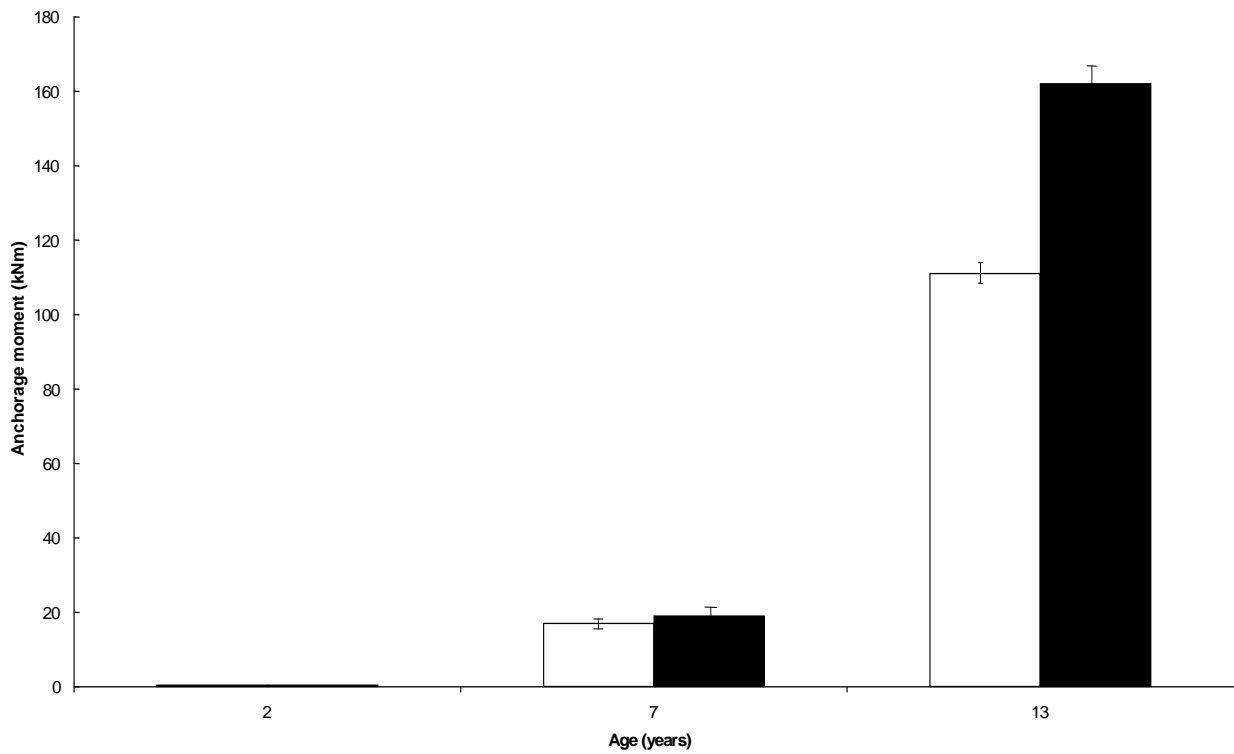


Fig 2. Applied bending moment increases with age in both Beaupre (white bar) and Raspalje (black bar) clones of poplar. Differences between clones are almost significant at age 16 years only ($F_{1,4} = 5.72$, $P = 0.075$). Bars are \pm standard error.

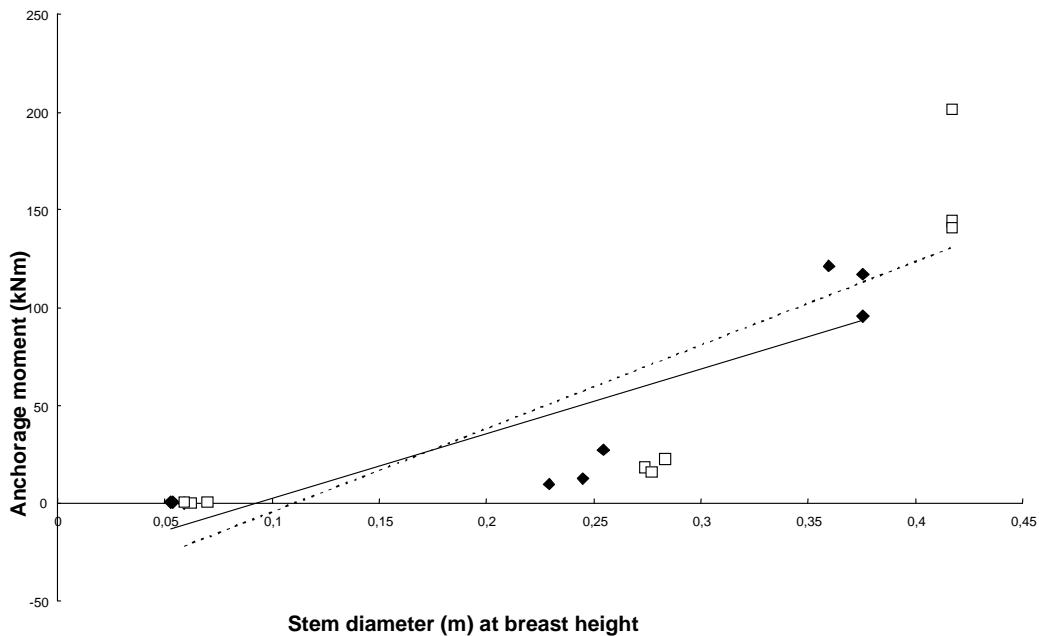


Fig. 3 Applied bending moment increased significantly with stem diameter in Beaupré ($y = 331.24x - 31.0$, $R^2 = 0.751$, $P = 0.002$, black symbols and solid line) and Raspalje ($y = 426.17x - 47.27$, $R^2 = 0.70$, $P = 0.005$, empty symbols and dotted line) clones.

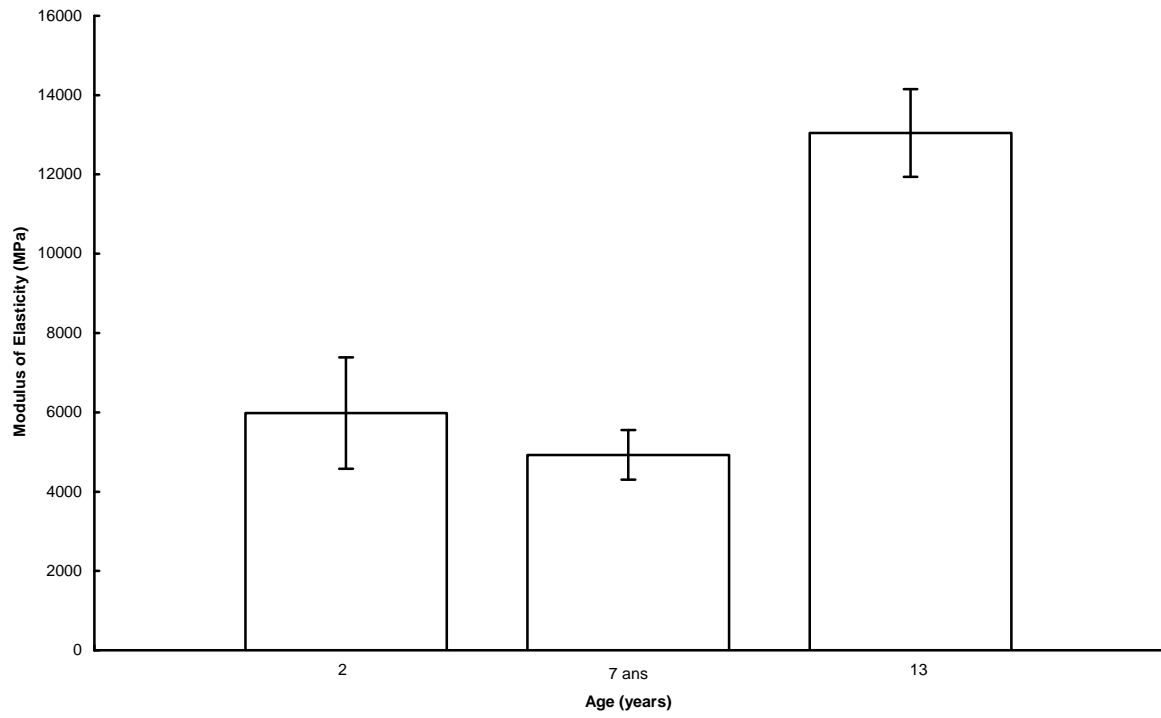


Fig. 4. Modulus of Elasticity was significantly greater in oldest Poplar clones ($F_{2,15} = 16.31$, $P < 0.001$).

IV.2 - Résultats de 2003

(Alexia Stokes, Pascal Blanquet, LRBB)

L'étude de la vulnérabilité d'un arbre consiste à simuler l'action du vent par des essais de flexion statiques (Coutts, 1986 ; Gardiner et al, 2000 ; Peltola et Kellomaki 1993). Pour une essence donnée, cette sensibilité dépend des caractéristiques de la tige (conicité, élasticité) et de la raideur de l'ancrage racinaire (développement et architecture du système racinaire). Cette méthode ne reproduit qu'imparfaitement l'action du vent (elle ne tient pas compte des oscillations dynamiques engendrées par des rafales successives). Toutefois, aucune différence significative au niveau des dégâts entre un arbre treuillé et un arbre balayé par le vent n'a pu être démontrée (Coutts 1986).

Ces expériences ont été menées sur plusieurs clones de peuplier dans le but de déterminer, à l'intérieur du peuplement, le moment de renversement critique (force pour ruiner un arbre multipliée par le bras de levier) en fonction de la taille de l'arbre.

Matériels et méthodes

Les sites d'études

Les peupleraies ont été sélectionnées de façon à satisfaire des critères :

- forestiers : peu ou pas de dégâts à la suite des tempêtes de décembre 1999 (en particulier, peu ou pas de trouées), présence d'une lisière ouest, surface suffisante ;
- pédologiques : présence d'un sol peu contraignant (pas de limitation à l'enracinement jusqu'à 100 cm de profondeur).

Deux plantations (200 arbres/ha) ont été ainsi retenues, l'une à Chinon (37) pour les cultivars Raspalje et Beaupré, l'autre, à Verdun (82), pour les cultivars Dorskamp et *I214*.

Toutes deux se trouvent dans des régions de plaines (respectivement à 105 m et 120 m d'altitude) et sont soumises à un climat océanique dégradé (précipitations annuelles respectives de 820 mm/an et 660 mm/an - données 1977/2000 de Météo France ; vent orienté ouest-nord/est, de vitesse moyenne comprise entre 4,5 et 5,5 m/s).

Pour les deux sites, situés sur des sols hydromorphes - sols dont la genèse est dominée par un excès d'eau saturant la totalité des pores, de façon permanente ou temporaire, sur la totalité ou la plus grande partie du profil- peu évolués d'apport alluvial à Gley profond (densité apparente de 1.55) pour lesquels la zone d'engorgement permanent apparaît au-delà de 100 cm de profondeur, les cultivars ont été choisis sur la même parcelle, pour minimiser les variations pédologiques.

Les arbres étudiés

Les arbres ont été sélectionnés à l'intérieur des peuplements (à une distance des lisières au moins égale à la hauteur dominante du peuplement) - il s'agit en effet de déterminer le moment de renversement critique pour des individus n'ayant pas développé de résistance particulière au vent. Ils étaient droits et sains, sans défauts apparents (absence de fourches et de blessures).

L'étude des cultivars de peuplier, davantage orientée sur la dynamique de l'enracinement, a porté sur 36 arbres seulement (9 par cultivars), répartis selon trois classes d'âge (phase d'installation jusqu'à 3 ans ; phase de croissance active de 4 à 8 ans ; phase de maturité de 9 à

16 ans). Les peupliers étant issus de clones, la variabilité entre individus est faible dans des conditions de croissance peu ou pas contraignantes.

Les essais de flexion

Les essais de flexion ont été réalisés à l'aide d'un système de treuillage constitué d'un câble et d'un tire-fort (type Hit-Trac 16B, Habegger, Suisse) pouvant exercer une force de traction inférieure ou égale à 16 kN.

Attaché au pied d'un arbre d'ancrage situé le plus loin possible de l'arbre fléchi - de façon à appliquer une force la plus horizontale possible et simuler l'action du vent, le tire-fort treuille le câble fixé à une hauteur correspondant à 25-40% (position proche du centre de masse) de la hauteur de l'arbre (Fig. 1).

La force appliquée est mesurée par une cellule de charge (utilisation de différents modèles, produits par Scaime S.A., France, en fonction de la taille de l'arbre). Des inclinomètres mesurent, à la base de l'arbre et au niveau du câble de treuillage, la déflexion de la tige au

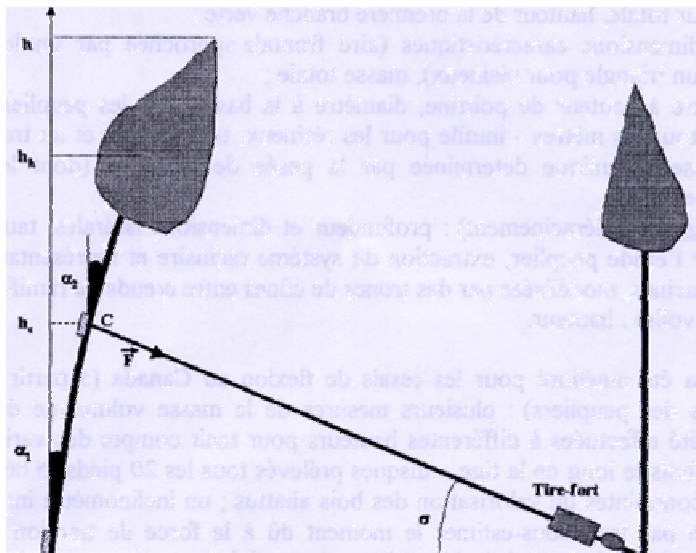


Fig. no1 : Essai de flexion.

cours de l'essai. Un système d'acquisition des données enregistre toutes les secondes l'intensité de la force exercée par le tire-fort et la valeur des angles mesurée par les inclinomètres.

Les essais de flexion furent conduits avant ou au tout début du débourrage, les tempêtes survenant généralement durant les mois d'hiver. Pour deux clones (Beaupré et Rapalje), un arbre sur trois a été fléchi jusqu'à la rupture de la tige ou du système racinaire, de façon à pouvoir réaliser une analyse de systèmes racinaire intacts (les paramètres manquants pour le calcul du moment de renversement critique ont alors été déterminés par extrapolation, ce qui peut se justifier par la faible variabilité morphologique des cultivars). Dans les peupleraies, très ouvertes, la direction de treuillage fut celle des vents dominants (vers l'est).

Les mesures effectuées sur l'arbre

Afin de calculer le moment de renversement critique, diverses mesures ont été effectuées - arbre : hauteur totale, hauteur de la première branche verte

- houppier : dimensions caractéristiques (aire frontale approchée par un losange), masse totale
- tige : diamètre à hauteur de poitrine, diamètre à la base, mesure de la circonférence tous les mètres, masse volumique déterminée par la pesée de billons (dont le volume a été préalablement estimé) ,
- plaque racinaire (si déracinement) : profondeur et dimensions latérales, taux d'humidité de la motte (extraction du système racinaire et représentation spatiale des fragments de racines, modélisées par des troncs de cônes entre noeuds de ramification) ; - chandelle (si volis) : hauteur.

Les calculs de moment de renversement total sont disponibles auprès de A. Stokes et formulés dans Cucchi et al (2003).

Analyse des résultats

Le mode de renversement : déracinement ou rupture de la tige

Lorsque les arbres ont été treuillés jusqu'à leur ruine, deux modes de rupture ont été observés : le déracinement et la casse du tronc. Les pourcentages de ces modes de casse sont donnés dans le Tableau 1.

Cultivar	Arbres déracinés, en % des arbres ruinés (<i>nombre d'arbres abattus</i>)	Rupture de la tige, en % des arbres ruinés (<i>nombre d'arbres abattus</i>)	Hauteur moyenne de la rupture, en % de la hauteur du bras de levier
Beaupré	34 (3)	66 (3)	1 (\pm 1)
Raspalje	50 (4)	50(4)	5 (\pm 2)
1214	89 (9)	11 (9)	19 (\pm 0)
Dorskamp	34 (9)	66(9)	14 (\pm 6)

Tableau n° 1 : Pourcentage d'arbres déracinés et brisés (au niveau de la tige ou du collier) parmi les arbres ruinés.

Il apparaît clairement que I214 est beaucoup plus sensible au déracinement que Dorskampf et Beaupré. Cependant, ces résultats doivent être relativisés en raison du nombre faible effectif étudié. Ces résultats suggèrent que I214 a une ancrage moins efficace que les autres cultivars, ou un tronc plus sensible à la casse.

Lors des essais de flexion statiques, la morphologie des parties aériennes de l'arbre (porosité du houppier, flexuosité des branches) a une faible incidence sur le mode de renversement ; en revanche, la vitesse de treuillage, la hauteur et surtout l'angle du câble pourraient avoir une influence.

Le moment de renversement critique

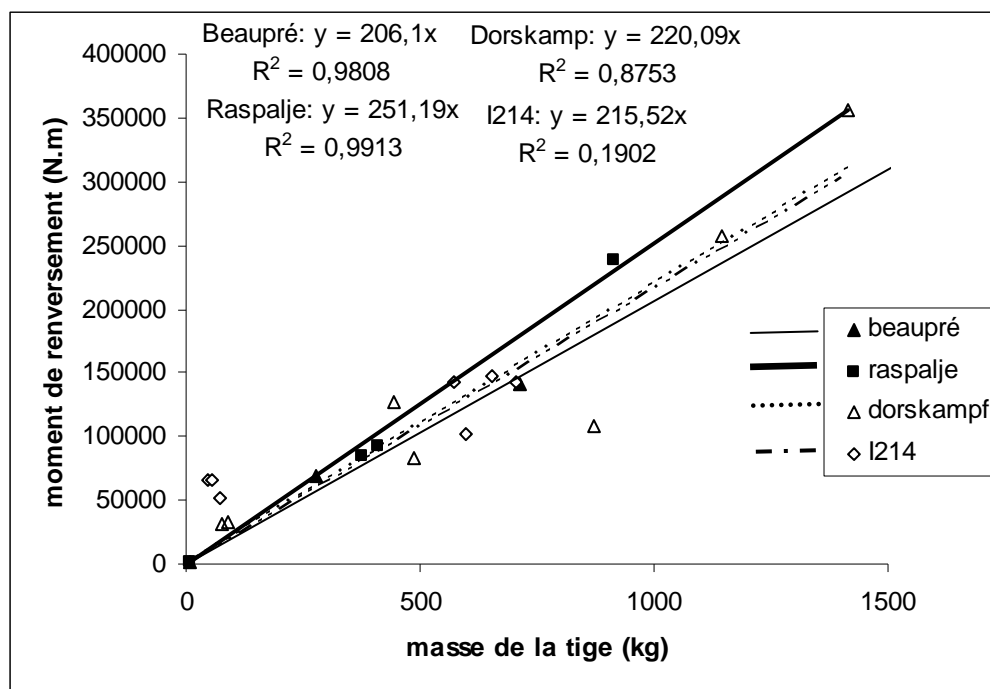
Suivant l'approche définie par Gardiner et al (2000), le moment de renversement critique (M_{crit}) a été exprimé en fonction de variables caractérisant les dimensions de l'arbre (h , d_{130} , d_{130}^2 , d_{130}^3 , hd_{130}^2 , masse de l'arbre m_{arbre} , masse de la tige m_{tige}). Les meilleures régressions ont été obtenues entre M_{crit} et m_{tige} ou hd_{130}^2 (Figs. 2a,b). Le moment appliqué maximal (sans prendre en considération le poids de l'arbre) a été calculé pour les cultivars 1214 et le Dorskampf, et corrélé avec les mêmes paramètres (Fig. 3) (toutes les valeurs sont présents

dans l'annexe 1). **Ce type d'analyse est nécessaire lorsque l'on travail sur du matériel d'âges et de dimensions différents.**

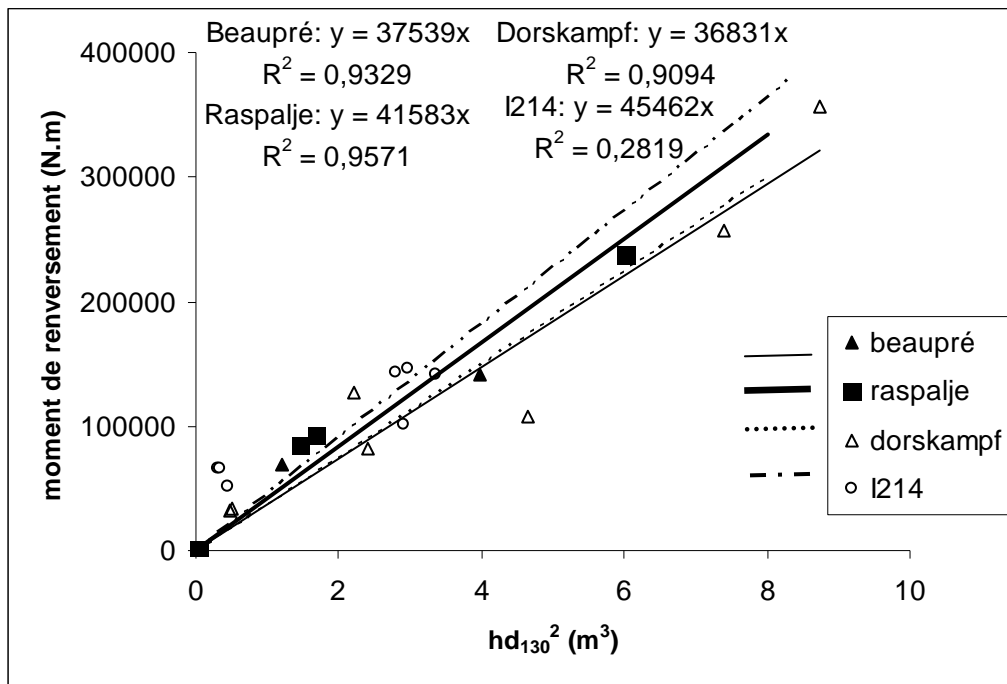
Concernant l'exploitation des données, pour les cultivars Beaupré et Raspalje, dans la mesure où les quelques arbres testés n'ont pas été tous fléchis jusqu'à leur ruine, il a été nécessaire d'extrapoler des variables concernant la morphologie des arbres, à partir de d_{130} et h . Cette approche est justifiée par la faible variabilité génétique inter-individus et le choix des arbres échantillonnés (même parcelle). La détermination du moment de renversement critique, pour les arbres demeurés intacts, a été alors basée sur l'évolution du moment de renversement total en fonction du moment exercé par le poids de l'arbre.

Néanmoins, ces résultats d'extrapolation, forcément biaisés, n'ont pas été pris en compte pour la caractérisation de M_r crit : même si le nombre d'arbres effectivement ruinés pour les cultivars Beaupré et Raspalje, est très faible, s'agissant d'individus clonés, il est possible de tirer des conclusions sur la résistance de l'ancrage racinaire (statistiquement, trois arbres par cultivar sont suffisants).

Pour les différents cultivars, la variable hd_{130}^2 , beaucoup plus accessible que la masse de la tige, permet de s'affranchir des erreurs d'estimation du volume et de la masse de la tige, donne également d'excellentes corrélations.



a)



b)

Figs 2. Le moment de renversement critique de l'arbre est fortement corrélé avec a) la masse de la tige et b) hd_{130}^2 pour chaque clone de peuplier. Les différences ne sont pas significatives entre les cultivars.

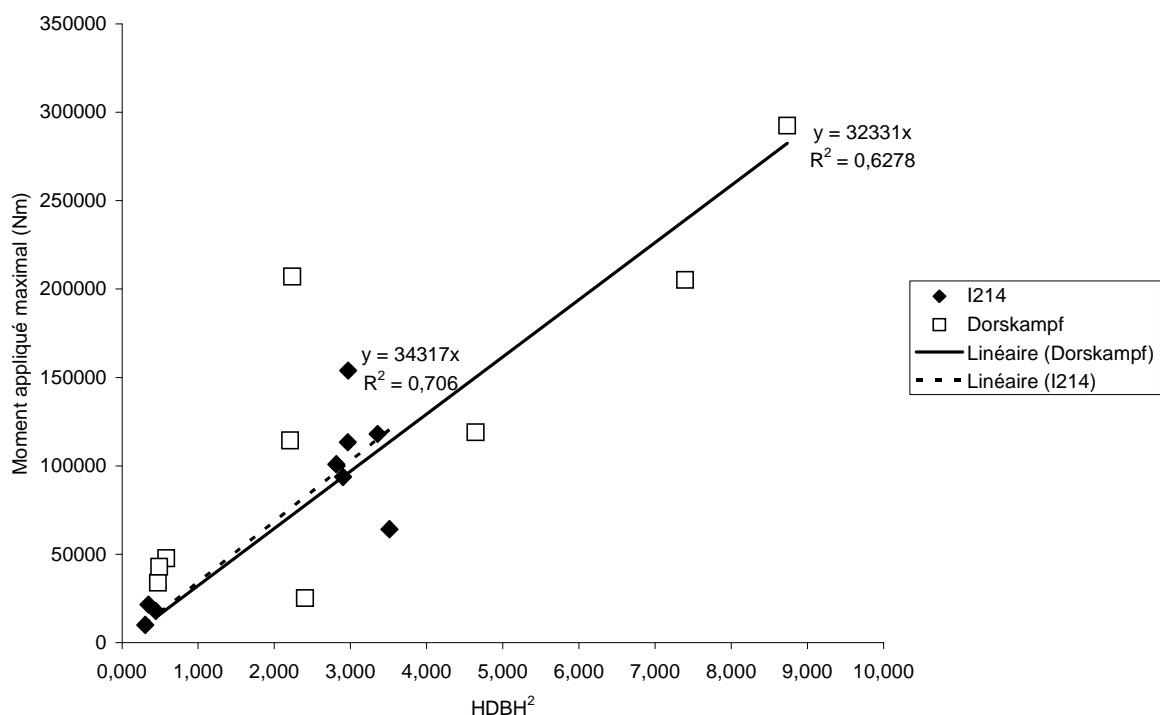


Fig. 3. Le moment appliqué (sans prendre en considération le poids de l'arbre) est significativement corrélé avec la hauteur x diamètre à 1.3m (m^3). Les arbres déracinés et brisés sont compris dans l'analyse. Il n'existe pas de différences significatives entre les clones I214 et Dorskampf.

Au point critique, la contribution du poids de l'arbre (le houppier représente 36 % dans la masse totale de l'arbre) dans le moment de renversement s'élève à 15 (± 3) % pour le Beaupré, 21 (± 3) % pour le Raspalje, 17 (± 8) % pour le 1214 et 29 ($\pm 7\%$) pour le Dorskamp.

Il n'existe pas de différence significative entre le moment de renversement requis pour déraciner ou briser les différents cultivars. Les régressions entre le moment critique et des différents paramètres allométriques de la partie aérienne sont très significatives, mais il existe une certaine variabilité. Cette variabilité pourrait être expliquée en partie par des différences de morphologie ou de topologie racinaire.

Analyse des systèmes racinaires pour les cultivars Beaupré et Raspalje

Pour examiner l'hypothèse que la variabilité du moment de renversement critique entre les différents cultivars dépend de l'architecture racinaire, nous avons cherché des meilleures régressions entre ce moment et les paramètres de la partie souterraine qui étaient disponibles (volume, nombre de branches, longueur et surface des racines et la topologie). A partir de mesures, réalisées par l'IDF, des systèmes racinaires des arbres fléchis (seules les données pour les cultivars Beaupré (9 arbres) et Raspalje (9 arbres) étaient disponibles), a été effectuée une analyse, par classe d'âge, du volume et de la surface des sections des racines (représentation spatiale des fragments de racines, modélisés par des troncs de cônes entre noeuds de ramification), en fonction de la distance à l'axe central.

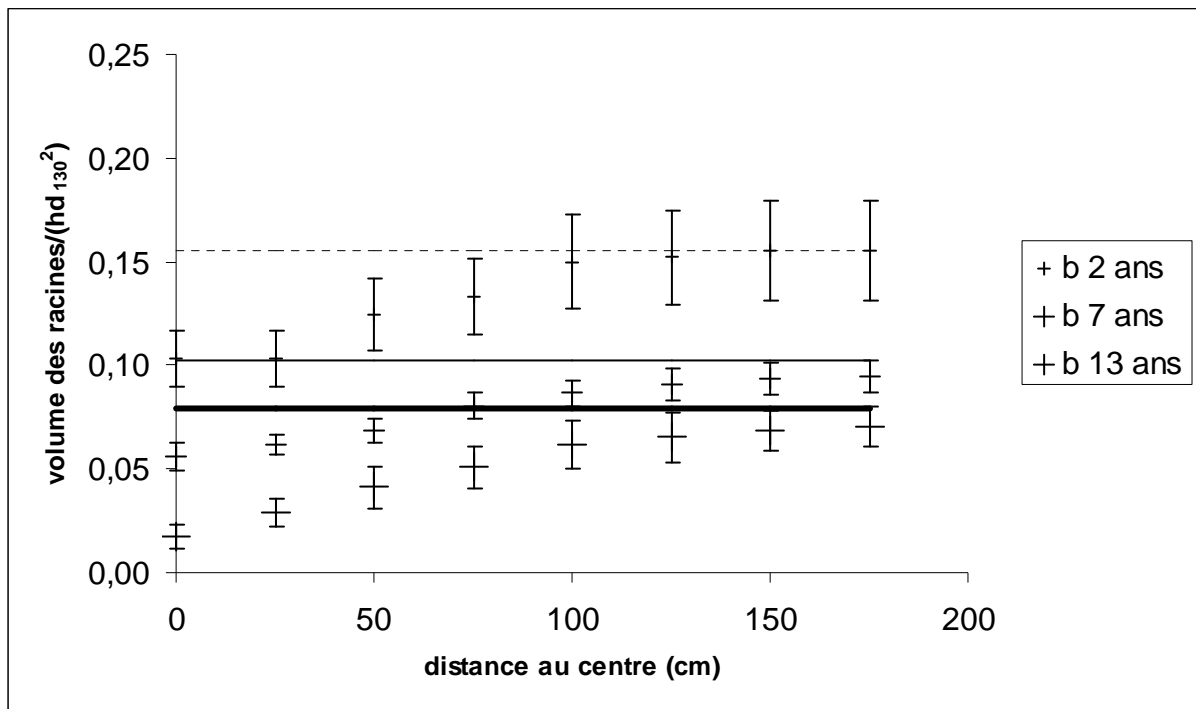
Le Beaupré est doté d'un système racinaire traçant : durant la phase d'installation et de croissance, (2 - 7 ans), le développement isotrope des racines latérales s'accompagne d'une prospection en profondeur ; en revanche, la phase de maturité (7 - 13 ans) est marquée par une croissance des racines latérales sans développement équivalent des racines en profondeur.

Le Raspalje est pourvu d'un système racinaire en coeur traçant : le développement racinaire, latéral et en profondeur, est continu (très légère anisotropie de la ramification et de la répartition massive des racines, pouvant indiquer une adaptation au vent : ramification et prospection latérale accrue des racines au vent, racines plongeantes sous le vent).

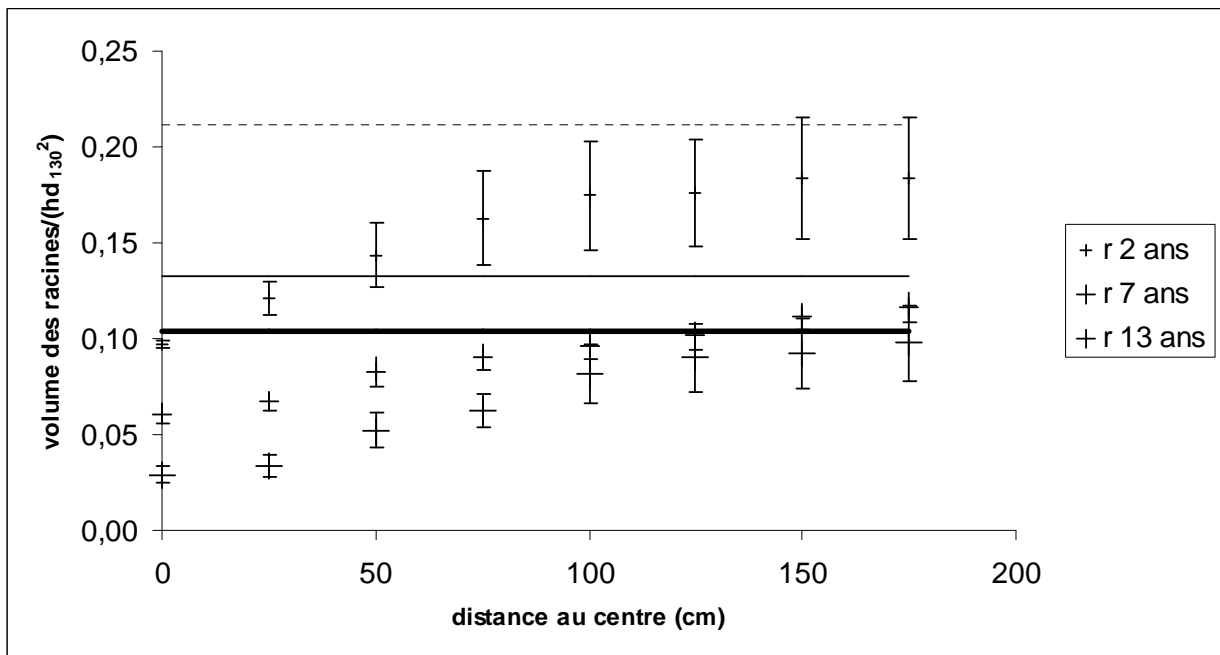
Comparativement, quelques légères différences apparaissent :

- le volume des racines (dont celui du pivot principal), relativement au volume de la tige, est plus important chez le Raspalje, quel que soit le stade développement (Fig. 4)
- le développement des pivots secondaires, par rapport aux racines latérales, est plus important chez le Raspalje,
- les racines sont très développées chez le Raspalje, plus fines et allongées chez le Beaupré, - la ramification est 2 à 3 plus élevée chez le Beaupré.

La longueur des racines apparaît plus importante chez le Beaupré : la ramification (à volume égal, les racines sont 1,26 fois plus longues dans la phase de maturité que chez le Raspalje) permet de pallier les dimensions, moindres, du système racinaire.



a)



b)

Fig. 4. La proportion cumulé des racines par rapport au tronc augment avec la distance à l'axe central. Le volume des racines est plus important chez a) le Raspalje que b) le Beaupré.

Des régressions entre M_r crit et le volume du système racinaire v , le nombre de branches x le volume nv , le volume x la profondeur du centre de gravité du système racinaire vl , ont été réalisées. La meilleure corrélation ($p < 0,001$) a été trouvé entre M_r crit et v (Fig. 5).

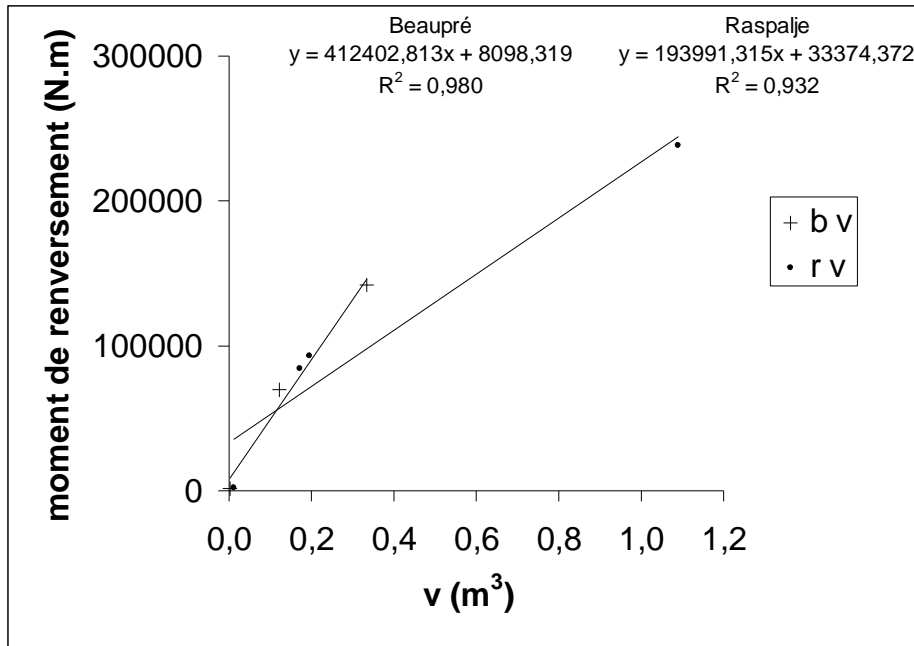


Fig. 5. Le moment de renversement est fortement corrélé avec le volume de racines. Il n'existe pas de différences significatives entre les clones.

Pour les cultivars Beaupré et Raspalje, un arbre sur trois seulement ayant été fléchi jusqu'à sa ruine, le moment de renversement total nécessaire pour provoquer une déflexion de la tige de 5° à mi-hauteur a été calculé pour tous les arbres étudiés. La meilleure régression a été trouvée entre le moment et le paramètre volume x nombre de branches (Fig. 6). Cependant, il n'existe toujours pas de différences entre les cultivars.

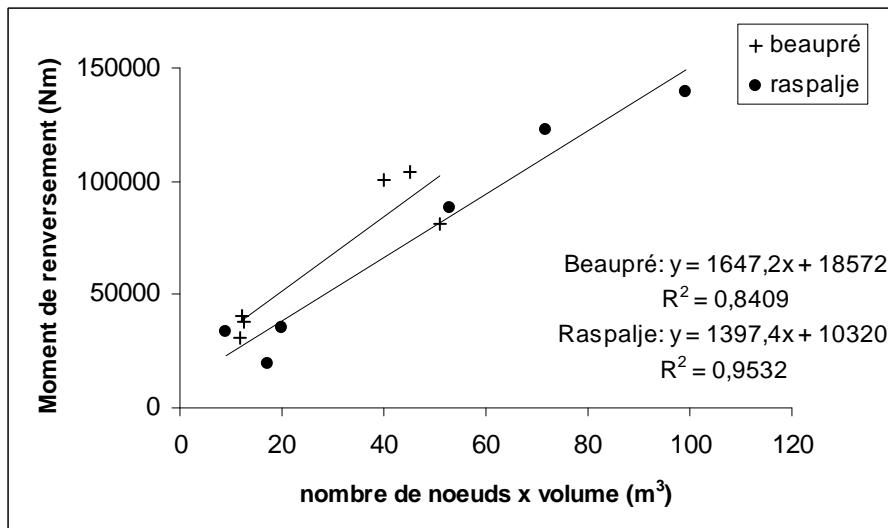


Fig. 6. Le moment de flexion à une déflexion de 5° est fortement corrélé avec le nombre de branches x volume des racines. Il n'existe pas de différence significative entre les cultivars.

Conclusion

L'étude réalisée a permis de corréler significativement le moment de renversement critique, et le moment appliqué maximal, avec la masse de la tige ou hd_{130}^2 , le volume et le nombre de ramifications du système racinaire. Il est impossible d'ébaucher, pour les arbres adultes, une

classification par résistance de l'ancrage racinaire. Il apparaît que I214 est plus sensible au déracinement que Dorskampf et Beaupré. Ces résultats suggèrent que I214 possède une ancrage moins efficace que les autres cultivars, ou un tronc plus sensible à la casse. Il n'y a pas de différence significative entre le moment appliqué maximal requis pour déraciner ou briser les différents cultivars.

L'hypothèse émise après analyse des volumes de bois abattus en France lors des tempêtes de décembre 1999 n'a pas été testée au niveau de la résistance de l'ancrage racinaire : il n'apparaît pas de façon évidente que les cultivars interaméricains sont plus résistants que les cultivars euraméricains, pour un type de sol donné. Cependant, des excellentes corrélations ont été trouvés entre le moment de renversement et des paramètres de la partie souterraine. Il est nécessaire maintenant d'examiner plus en détail ces paramètres chez I214 et Dorskampf, où les mesures d'architecture racinaire sont plus détaillées, en espérant de trouver la source de la variabilité observés dans des courbes du M_r crit et les données allométriques de la partie aérienne. Ceci n'a pas encore été faite par d'autres auteurs et pourrait nous donner des informations précieuses sur la résistance de l'arbre au vent.

References

Coutts M.P. 1986. Components of tree stability in Sitka spruce on peaty, gley soil. *Forestry* 59, 173-97.

Cucchi V., Meredieu C., Stokes A., Berthier S., Bert D., Najar M. 2003. Root anchorage of inner and edge trees of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait) growing in different soil podzolic conditions. Submitted to *Trees*.

Gardiner BA, Peltola H., Kellomaki S. 2000. Comparison of two models for predicting the critical windspeed required to damage coniferous trees. *Ecol. Modell.* 129: 1-23.

Peltola H, Kellomäki S 1993 A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica* 27, 99-111.

Annexe 1 : caractéristiques principales des arbres étudiés

(moyenne ± écart-type – standard error)

âge (année)	cultivars interaméricains						cultivars euraméricains					
	Beaupré*			Raspalje*			I214			Dorskamp		
	2	7	13	2	7	13	4	9	14	4	8	16
hauteur	7.2	18.5	27.7	7.0	20.2	31.8	13.7 ± 0.7	26.5 ± 0.2	25.3 ± 1.0	14.5 ± 0.6	22.0 ± 1.4	33.5 ± 2.0
d ₁₃₀ (m)	0.06 ± 0.00	0.24 ± 0.01	0.37 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.28 ± 0.00	0.42 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.34 ± 0.02	0.35 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.32 ± 0.01	0.45 ± 0.06
h/d ₁₃₀	129.5	72.6	74.9	112.6	72.6	75.6	84.6 ± 5.5	78.8 ± 4.2	72.0 ± 3.0	77.5 ± 4.8	68.2 ± 5.8	75.1 ± 7.1
Masse du houppier (Kg)	9.5	73.9	349	13.3	85.1	355.6	22.1 ± 8.3	282.9 ± 14.1	355.8 ± 54.8	17.9 ± 3.0	228.2 ± 5.8	477 ± 150
Masse du tronc (Kg)	8.2	249.4	738.7	8.1	389.8	989.7	57.6 ± 7.5	587 ± 25.1	601.2 ± 29.7	90.3 ± 8.9	472.0 ± 13.6	1144 ± 157
longueur relative du houppier (%)	53.0	60.5	70.9	41.3	63.7	68.6	58.2 ± 1.9	62.9 ± 1.3	58.1 ± 2.0	55.7 ± 2.1	58.6 ± 3.6	68.1 ± 3.1
masse du houppier/masse des parties aériennes	53.7 ± 0.9	23.0 ± 2.0	32.1 ± 1.2	62.2 ± 1.2	17.9 ± 0.2	26.5 ± 1.7	26.0 ± 7.9	31.4 ± 1.6	36.9 ± 7.9	16.5 ± 2.9	32.6 ± 0.4	27.8 ± 8.0
masse volumique du bois vert (kg/m ³)	798	845	894	768	868	842	670 ± 85	737 ± 65	655 ± 29	778 ± 122	632 ± 14	844 ± 36
Profondeur de la plaque racinaire (m)	-	-	-	-	-	-	0.3	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.0	-	-	1.6 ± 0.1
Moment critique de renversement (Nm) arbres brisés non inclus	-	63074	144964	2007	92173 ± 9024	291150	60839 ± 4573	128774 ± 13543	146770	32723 ± 1221	105028 ± 31562	240547 ± 124896
Moment maximal appliqué (arbres brisés inclus)	1624 ± 683	63074	144964	2007	92173 ± 9024	291150	16502 ± 3377	104240 ± 7221	110454 ± 25943	41408 ± 4062	115481 ± 52490	205520 ± 50048
déflexion critique (°) – arbres brisés non inclus	-	23.9	8.7	-	10.5	4.8	7.4 ± 4.6	6.6 ± 3.4	8.2	18.1 ± 0.4	10.5 ± 6.4	7.0 ± 2.4

*: un arbre sur trois a été fléchi

- PARTIE V -

**SUIVI OPTIQUE
DES DEFORMATIONS
DU TRONC ET DU SOL**

V.1 - Résultats de 2002

(Eric Robin, Fabrice Brémand, LMS)

1. Exploitation des 18 essais de flexion

1.1. Objectifs

La position du centre de rotation de l'arbre et la localisation des zones de fortes courbures du tronc donnent des informations importantes sur la rigidité et la qualité de l'ancrage racinaire de l'arbre étudié.

Il nous a alors fallu adapter une technique de mesure de visualisation que nous utilisons en Laboratoire sur des éprouvettes de petites dimensions. En effet, nous avons dû tenir compte de la grande hauteur des arbres qui introduit une variation importante du grandissement entre le haut et le bas des images enregistrées.

Dans un premier temps nous allons présenter le dispositif expérimental utilisé, les résultats de trajectoires des arbres et la cartographie des courbures locales en fonction de l'évolution de la sollicitation mécanique, enfin nous montrerons une comparaison entre les deux variétés qui permettra de mieux comprendre la tenue des peupliers au sol.

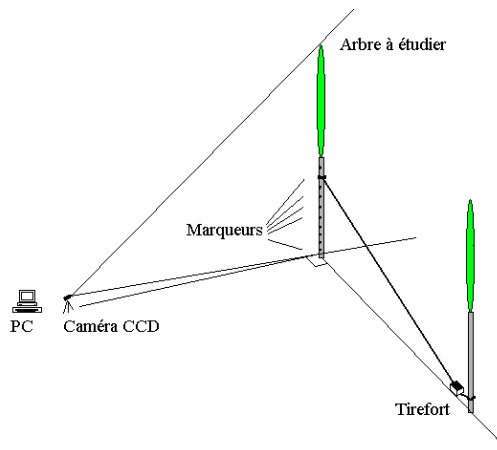
1.2. Dispositif expérimental

A partir d'un système d'acquisition d'images, composé d'une caméra CCD et d'une carte d'acquisition, et via un traitement informatique nous pouvons déterminer la position réelle d'un marqueur et le suivre (Breque et *al.*, 2001). La position réelle s'obtient généralement grâce à un montage de stéréovision (deux caméras, deux yeux...) (Denis et *al.*, 2000). En fait, nous n'avons pas travaillé en stéréovision car la distance entre les deux points de vue aurait été beaucoup trop grande (plusieurs dizaines de mètres) ce qui pouvait être difficilement applicable dans la peupleraie (branchage, disposition des arbres, éclairage différent...). D'après le protocole d'essais fourni par nos partenaires, nous avons supposé que l'arbre doit plus ou moins fléchir dans la direction du câble de traction. Lors de cette étude, nous avons mis au point une procédure de calibrage spécialement adaptée au cas des arbres (Robin, 2002) permettant à partir d'une seule image de passer des positions CCD (pixel) aux positions réelles en mètres. Nous pouvons donc rendre compte de l'évolution de la position réelle du marqueur pendant son déplacement.

Des taches de peinture noire (faisant office de marqueurs) ont été disposées tout au long du tronc de chaque arbre à étudier (Fig. 1).



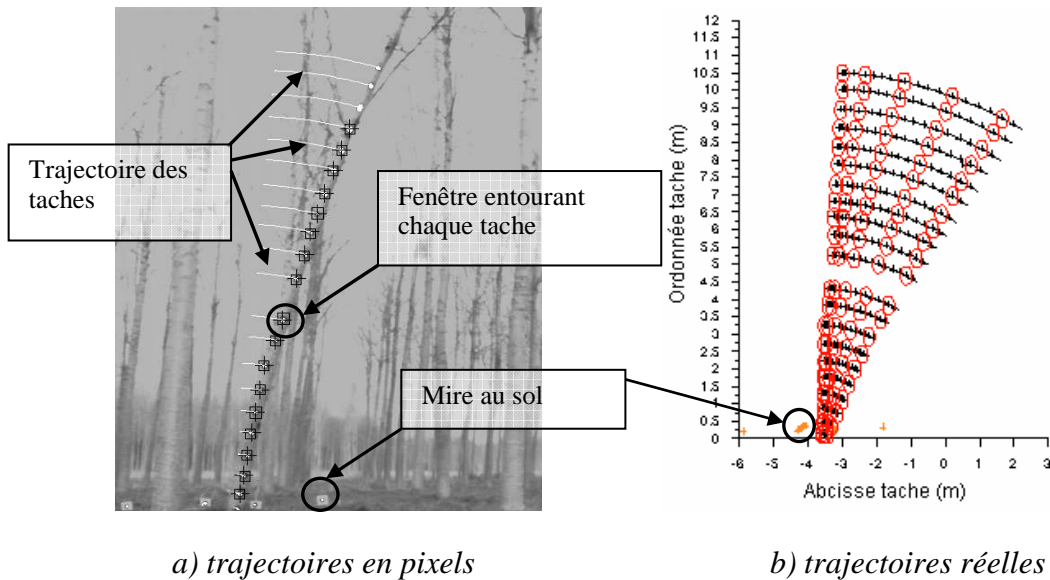
a) photo des taches



b) schéma de l'environnement expérimental

Fig. 1 : Dispositif expérimental

Ainsi l'évolution de la position de chacune des marqueurs nous permet d'obtenir l'évolution de la déformée du tronc pendant les essais de flexion. A titre d'illustration (Figure 2), nous avons choisi un arbre âgé de 13 ans (Beaupré).



a) trajectoires en pixels

b) trajectoires réelles

Fig. 2 : Résultats de la déformée

Sur la figure 2a, on peut remarquer la présence de mires disposées au sol. Il s'agit tout simplement de petits panneaux de cartons (fond blanc et disque noir) solidaire du sol. Elles nous renseignent sur ses déplacements verticaux et horizontaux proche de la base de l'arbre. On peut voir leur trajectoire sur la figure 2b.

On peut évaluer la précision de la mesure sur la position d'une tache à environ 20 mm ce qui correspond à une précision de l'ordre du pixel au niveau de l'image.

1.3. Exploitation des résultats

Calcul du centre de rotation

Dans une première approximation, nous avons interpolé au niveau de l'encastrement la trajectoire de chaque état de sollicitation par une droite. Puis en calculant les coordonnées du point d'intersection de deux droites, et cela de proche en proche, c'est à dire tout au long de l'essai, nous pouvons avoir une estimation de l'évolution de la position du centre de la rotation de l'arbre lorsque celui-ci fléchit (Figure 3).

Cette démarche a été utilisée pour les quatre arbres les plus fortement sollicités : deux Raspalje (7 ans et 13 ans) et deux Beaupré (7 ans et 13 ans). On constate (Figure 4) que globalement et quel que soit l'âge des arbres, le centre de rotation se trouve être plus en profondeur pour les Raspalje. Alors que pour les Beaupré, celui-ci se trouve être plus près de la surface du sol (Figure 4). Il semble également, que ce centre se trouve être plus stable pour les arbres de 13ans que pour les arbres de 7ans.

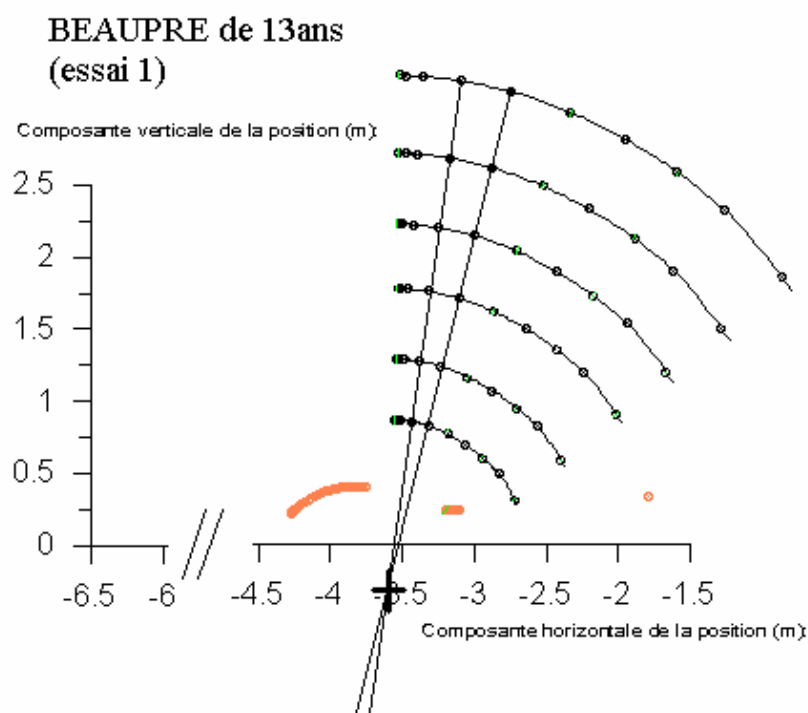


Figure 3 : Calcul du centre de rotation

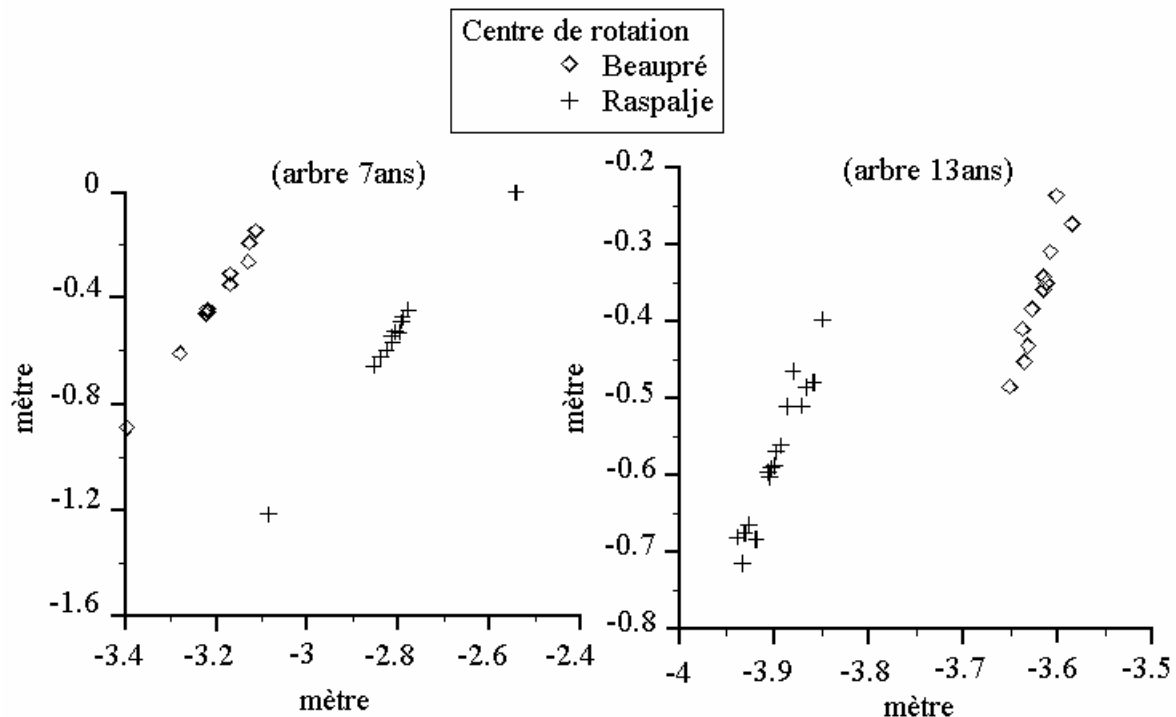


Figure 4 : Evolution des positions des centres de rotation des Raspaljes et des Beauprés calculées par interpolation.

Cartographie de l'évolution des courbures pendant la sollicitation :

De façon similaire, mais sur toute la hauteur nous avons interpolé la déformée du tronc (Figure 5) par une fonction spécifique à six paramètres pour rendre parfaitement compte des courbures locales mais aussi parce que les taches ne sont pas alignées à l'état repos. En effet, cela dépend de la forme initiale du tronc du peuplier. Nous avons calculé alors une courbure initiale, puis nous l'avons soustrait aux valeurs de courbures obtenues à l'aide des autres images au cours de la sollicitation.

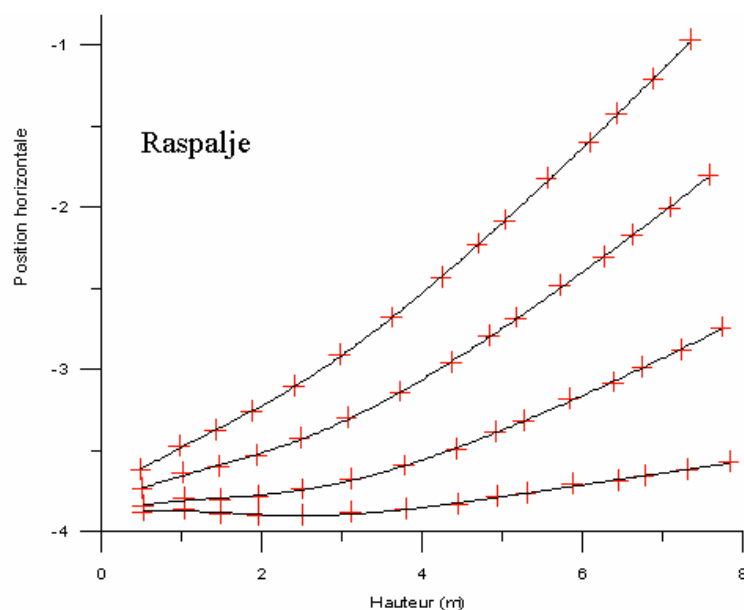


Figure 5 : Interpolation de la déformée du tronc par une fonction spécifique

Sur la figure 5, nous avons interverti les axes verticaux et horizontaux, car nous interpolons la déformée par la méthode des moindres carrés qui utilise une minimisation non orthogonale, pour la détermination des paramètres de la fonction.

Ceci nous permet de mettre en évidence l'évolution de la courbure du tronc et cela en fonction de la hauteur (en ordonnée) et en fonction du temps (en abscisse).

Nous présentons nos cartographies aux pages suivantes : figure 6 pour les arbres de 7 ans, figure 7 pour les arbres de 13 ans. Celles-ci se trouvent être classées par types d'essais (verse totale ou bien de type charge décharge). A savoir que les deux cartographies se trouvant à gauche de chaque page représentent les essais où les arbres ont été contraints à tomber. On doit aussi souligner qu'un Raspalje de 7 ans s'est cassé, la cartographie correspondante est située en bas à droite de la figure 6. Nous nous sommes d'ailleurs appuyés sur cet essai pour fabriquer l'échelle des courbures, afin de pouvoir comparer toutes les déformées. L'échelle des courbures va de -0.75 m^{-1} (bleu foncé) à 0.2 m^{-1} (rouge). La valeur de 0.2 m^{-1} correspond à un rayon de courbure de 5 mètres (relativement faible pour un arbre), on la retrouve généralement là où l'arbre pli le plus c'est à dire où il est le plus contraint mécaniquement. Ces zones visualisent les zones possibles de cassure. Les zones bleues foncées montrent des rayons de courbure négatifs, il s'agit en fait de bruit présent sur une seule image et sur la deuxième il s'agit de l'arbre qui a cassé montrant ainsi le retour vers l'origine du pied de l'arbre. Les zones intermédiaires bleue claire montrent de très grands rayons de courbure témoignant que l'arbre possède des parties qui se déforment peu.

Pour les arbres de 7 ans, il apparaît des zones de concentrations de courbures autour de 2 mètres de hauteur sur les Raspalje alors que pour les Beaupré la courbure semble plus répartie sur toute la hauteur du tronc.

Pour les arbres de 13 ans, on remarque pour les Raspalje que la zone de forte courbure se situe plus haut (aux alentours de 4 à 6 mètres) et que pour les Beaupré cette zone est apparue proche du sol entre 1 et 2 mètres.

Nous n'avons pas pu déterminer la cartographie des courbures des arbres de 2 ans car l'effort de flexion a été généré manuellement ce qui a introduit beaucoup de perturbations sur la position des taches et la déformée des arbres.

Conclusion sur les essais de flexion

Dans un premier temps nous avons constaté que la position du centre de la rotation se trouve être plus enfoncée pour le Raspalje que pour le Beaupré. Il vient donc que le Raspalje a un système racinaire mieux ancré que celui du Beaupré. De plus, à l'aide de nos cartographies on observe une concentration de courbures à la base des beauprés, alors que celle-ci se trouve être localisée plus haute sur le tronc pour le Raspalje. Ceci nous indique que la base du Raspalje est plus rigide que celle du Beaupré.

On peut alors penser d'un point de vue mécanique, que le Raspalje aura tendance à se briser, alors que le Beaupré ayant une structure moins rigide, aura tendance à se coucher.

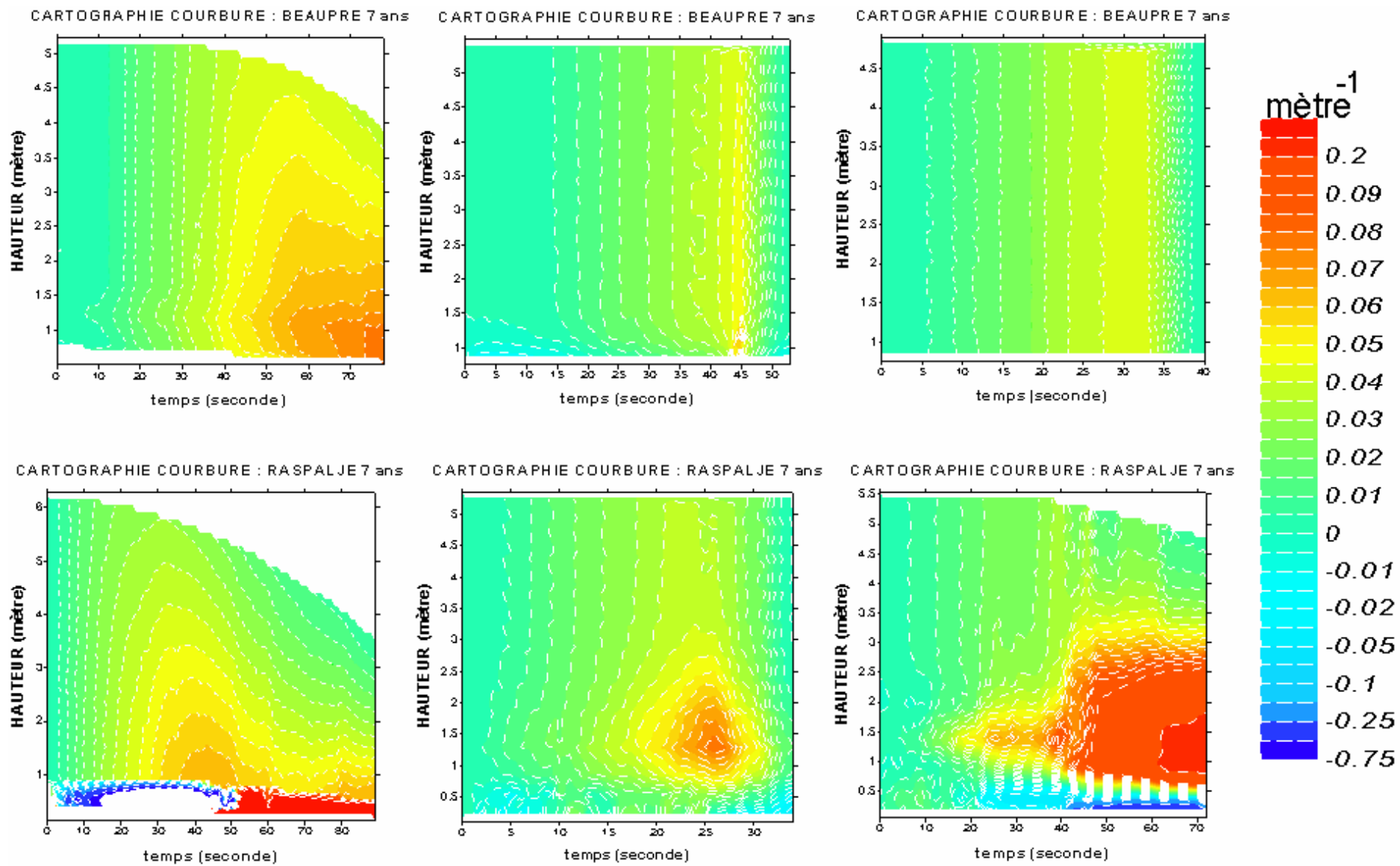


Figure 6 : Courbure des arbres de 7 ans: Raspalje en bas, Beupré en haut, Arbres couchés à gauche, sollicitation charge-décharge ailleurs

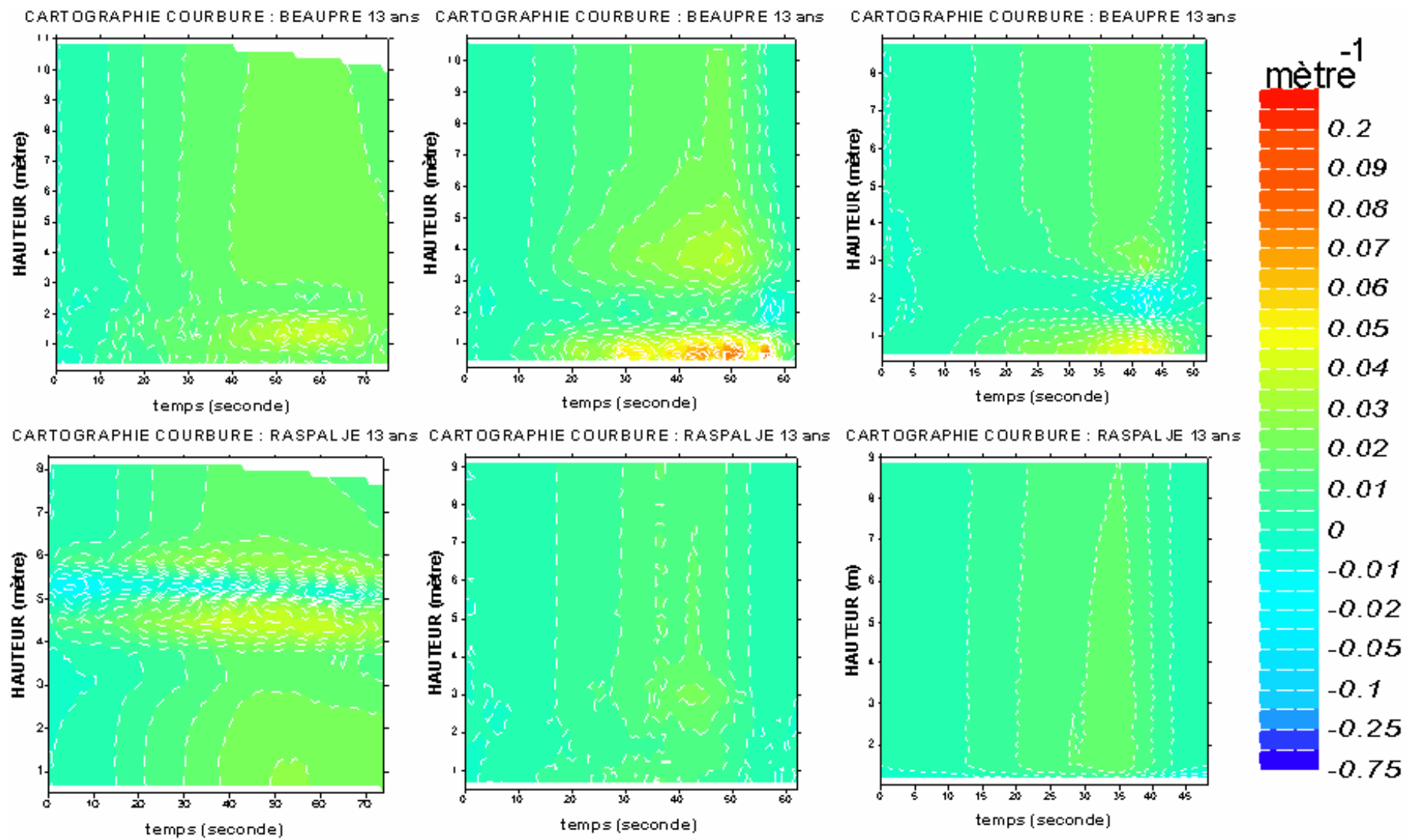


Figure 7 : Courbure des arbres de 13 ans: Raspalje en bas, Beaupré en haut, Arbres couchés à gauche, sollicitation charge-décharge ailleurs

2. Exploitation des échantillons prélevés sur les systèmes racinaires

2.1. Objectifs

Dans le but de réaliser un modèle numérique, par la méthode des éléments finis, de l'encastrement du peuplier il est absolument nécessaire de connaître les caractéristiques mécaniques du matériau. Nous nous sommes limités au module d'Young et à la contrainte à la rupture qui sont les grandeurs mécaniques les plus communes. Nous supposons alors que le matériau suit une loi élastique de type isotrope. Il est possible malgré tout de tenir compte de l'orthotropie en évaluant sans essais les autres coefficients par rapport au module d'Young.

Nous allons vous présenter les dispositifs expérimentaux utilisés, les résultats obtenus et enfin les conclusions que nous avons tirées de ces résultats.

2.2. Démarches expérimentales

Nous avons prélevé des échantillons sur les différents systèmes racinaires. Les mesures ont été réalisées sur du bois vert. Pour cela nous avons utilisé les méthodes optiques déjà élaborées par l'équipe, nous permettant d'obtenir les déplacements et les déformations.

Le déplacement a été exploité pour les essais de flexion trois points, et les déformations pour les essais de traction. Puis, à partir des équations de la Résistance des Matériaux, nous avons déterminé les paramètres recherchés.

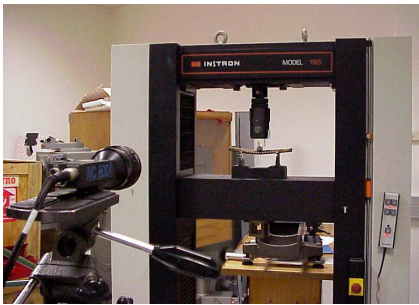


Figure 8 : Dispositif expérimental

Nous avons travaillé en imposant le déplacement. Nous avons donc posé sur un socle en U les racines, puis nous avons monté le plateau et récupéré l'effort via la cellule de charge. Nous avons utilisé deux socles, l'un servant à soutenir les grosses racines, et l'autre pour les petites racines.

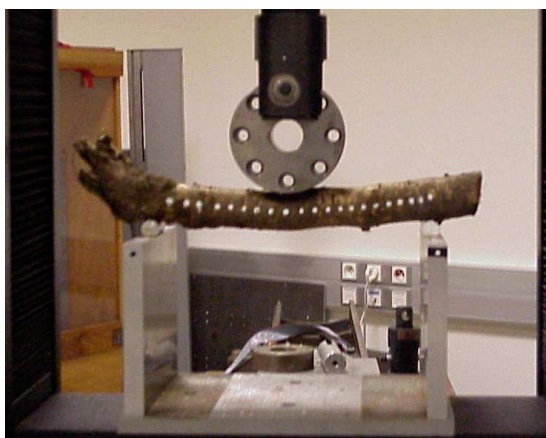


Figure 9 : Dispositif pour les grosses racines

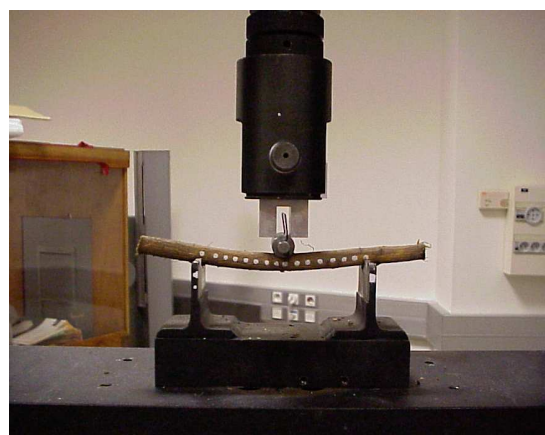


Figure 10 : Dispositif pour les petites racines

2.3. Présentation des résultats

D'un point de vue pratique, il a été très difficile de prélever des racines de bois vert presque rectilignes et avec un diamètre constant nécessaire pour éviter des variations du moment quadratique lors des essais de flexion et des changements de sections pour les essais de traction. De plus, les chercheurs de l'IDF voulaient prendre toutes les cotes du système racinaire pour en réaliser le modèle géométrique. Nous avons donc dû faire un choix méticuleux, pour éviter de détruire la géométrie des systèmes racinaires. Finalement, nous avons coupé au total 18 portions de racines réparties sur tous les systèmes racinaires.

Les résultats de nos mesures sont montrés sur les figures 10 et 11 sous formes d'histogrammes. La figure 10 représentent les valeurs du module d'Young, la figure 11 les valeurs de la contrainte à la rupture.

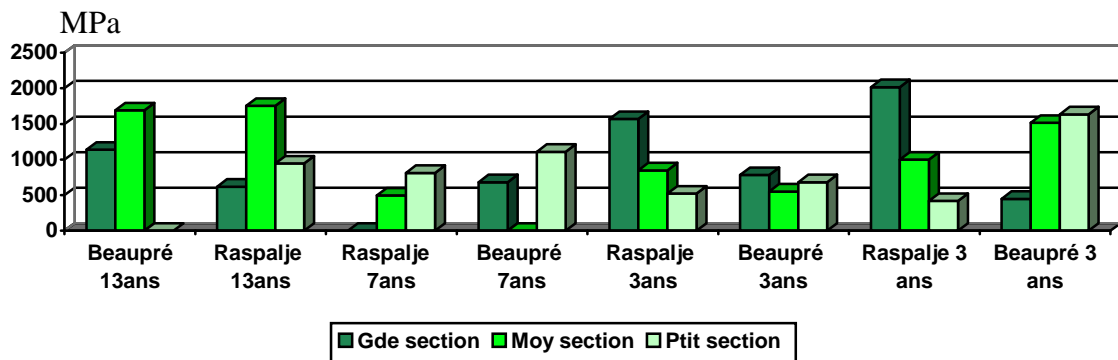


Figure 10 : Module d'Young

On peut observer une dispersion d'un facteur trois (tout à fait normal compte tenu du caractère biologique du matériau) pour la valeur du module d'Young. Cependant il faut noter qu'une valeur donnant un ordre de grandeur suffit largement pour le modèle numérique proposé pour ce projet. En effet, d'après nos constatations sur le matériau mais [2] inclure dans le code de calcul une valeur variant d'un facteur trois n'aura que peu de répercussion sur le résultat final.

Nous obtenons donc une valeur moyenne d'environ 1000 MPa pour le module d'Young.

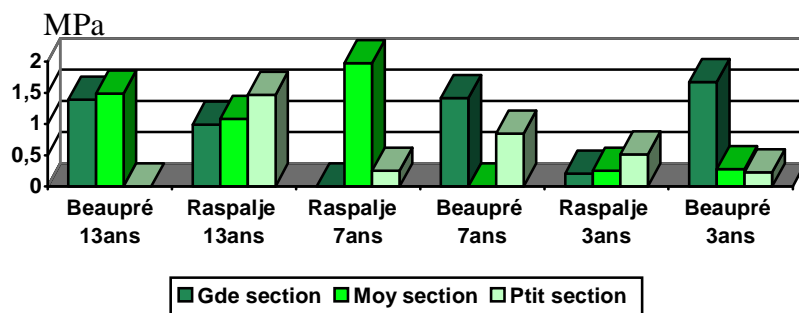


Figure 11 : Contrainte à la rupture

Les résultats trouvés nous montrent la fragilité des racines, puisque les contraintes à la rupture fluctuent entre 1 MPa et 2 MPa. Là encore, une valeur moyenne suffit pour le modèle numérique proposé. Nous obtenons alors une valeur moyenne d'environ 1,5 MPa pour la contrainte à la rupture.

V.2 – Résultats de 2003

(Fabrice Brémand, Eric Robin, Daniela Oboroceanu, LMS)

Nous présentons dans ce rapport la deuxième campagne d'essai réalisée, en 2003, par l'équipe Photomécanique et Rhéologie. Cette étude regroupe à la fois le LMS, l'IDF, l'INRA et le LRBB au sein du projet « Etude de l'ancrage racinaire des peupliers ».

Rappelons que le travail de recherche de l'équipe Photomécanique et Rhéologie concerne le développement, la réalisation et l'exploitation de méthodes expérimentales de mesure de grandeurs cinématiques (déplacement, déformation), de champs de contraintes et de température. Ces méthodes sont développées pour le contrôle de structure, couplées ou non avec des méthodes numériques (types éléments finis), pour l'étude du comportement de matériaux divers (biologiques, polymères, composites, métaux...). Elles font appel à des processus optiques, les images ainsi formées étant numérisées par caméra CCD puis analysées numériquement. Ces méthodes ont depuis quelques années un regain d'intérêt car outre l'apport des processus d'analyse et de traitement d'images qui permet la simplification de l'exploitation par des mesures sans contact et non perturbées d'une part et le besoin de résultats expérimentaux de plus en plus réalistes d'autre part, elles offrent la possibilité d'approcher des conditions aux limites réelles conduisant ainsi à une modélisation plus fine.

Durant la première campagne d'essais, notre équipe a développé et utilisé in situ (essais de flexion dans les peupleraies) une méthode de mesure sans contact permettant de suivre l'évolution de la déformée du tronc. Nous avons pu analyser les courbures de chaque arbre, mesurer les déplacements du sol et déterminer l'évolution de la position du centre de rotation de l'arbre. L'ensemble de ces données nous renseigne sur la rigidité et la qualité de l'ancrage racinaire de l'arbre étudié. Nous avons également déterminé les modules d'Young et les contraintes à la rupture d'échantillons prélevés sur le système racinaire. Cette campagne d'essais avait été réalisée près de Chinon sur des Beauprés et des Raspaljes,

Cette année nous avons réalisés avec nos partenaires une deuxième campagne d'essais près de Verdun sur Garonne pour étudier deux nouvelles variétés les I_214s et les Dorskamps, ayant des horizons pédologiques différents.

1. Exploitation des 21 essais de flexion

1.1 Objectifs

Dans un premier temps nous allons faire un succin rappel du dispositif expérimental utilisé, puis nous présenterons les résultats obtenus et nous établirons une comparaison (cartographie des courbures, déplacements du sol, etc...) entre les deux campagnes d'essais. Nous avons résumé dans le tableau suivant les différents essais que nous avons réalisés (Figure 1).

	4 ans	8ans	9ans	14ans	16ans
I_214	3 essais		6 essais	3 essais	
Dorskamp	3 essais	3 essais			3 essais

FIGURE 1 : REPARTITION DES DIFFERENTS ESSAIS SELON L' AGE, ET LA VARIETE

1.2 Dispositif expérimental

A l'aide d'une caméra CCD, d'une carte d'acquisition, et via un traitement informatique nous pouvons déterminer la position réelle des marqueurs qui ont été disposées tout au long du tronc des arbres étudiés (Figure 2).

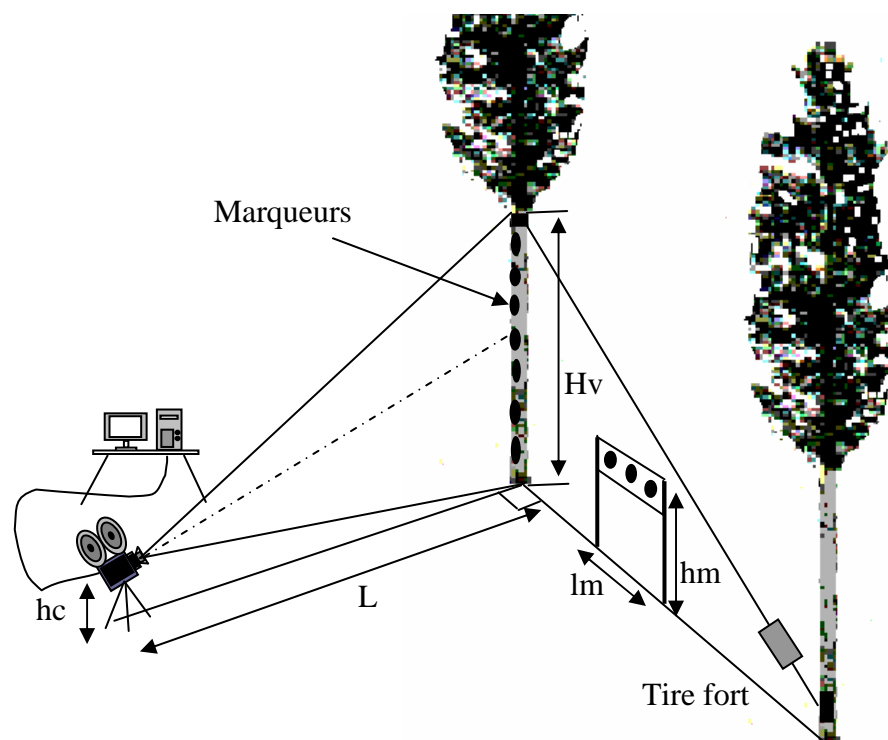


Figure 2 : Dispositif expérimental

1.3 Exploitation des résultats

La positions des marqueurs nous permet d'obtenir les cartographies des courbures, les déplacements du sol (à l'aide de marqueurs disposés au sol près de la base de l'arbre), et l'évolution de la position du centre de rotation. Cette année, nous avons en plus calculé les inclinaisons à la base de l'arbre, et près du point d'attache du câble tracté par le tire fort. Ces données vont permettre à l'équipe du LRBB de calculer les moments appliqués. Lors de la première campagne deux inclinomètres avaient été utilisés.

1.3.1. Déplacement du sol

Nous avons observé que les déplacements au sol sont très importants pour les I_214 (Figure 3), alors qu'ils sont pratiquement nuls pour les Dorskamps (Figure 4).

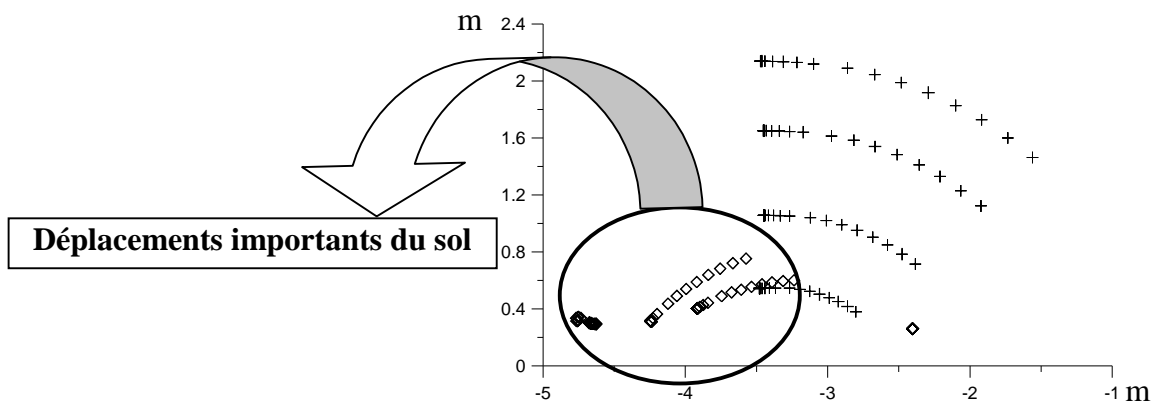


Figure 3 : Déplacement du sol d'un I_214

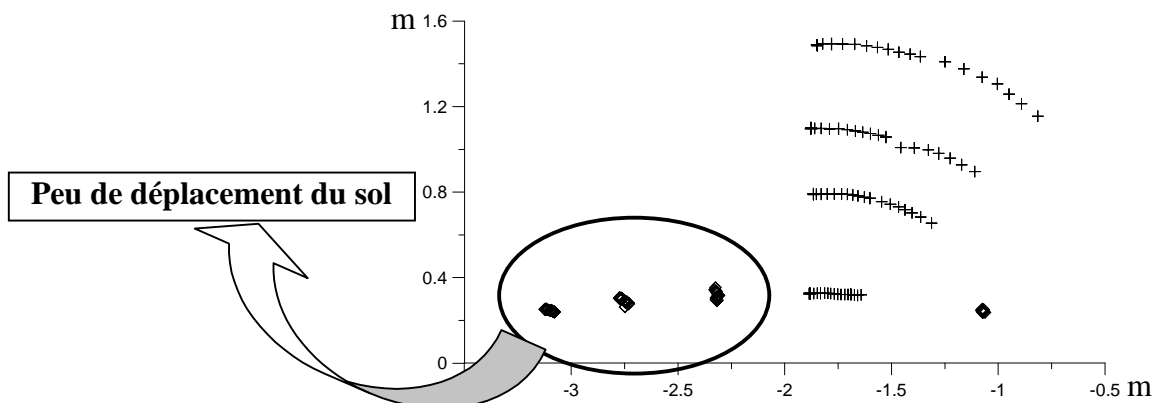


Figure 4 : Déplacement du sol d'un Dorskamp

1.3.2. Cartographie de l'évolution des courbures pendant la sollicitation

On note des évolutions différentes selon les espèces. Contrairement à la première campagne d'essai, nous avons cette année fait tomber tous les arbres. Cela entraîne que nous avons plus d'informations sur l'évolution de la courbure du tronc de la verticale jusqu'à une inclinaison d'environ 50° (avant que l'arbre soit caché par ses voisins).

Globalement, on remarque que le tronc du I_214 commence par se courber, puis redevient droit (figure 5).

En effet, le tronc commence par se plier, puis sous l'effet de la charge une partie de la plaque racinaire cède et pivote ce qui permet au tronc de redevenir à nouveau droit (Figure 6).

D'ailleurs ceci se recoupe avec les constatations faites au sujet de la progression du centre de rotation (enfouissement suivi d'une montée) et des déplacements du sol (importants).

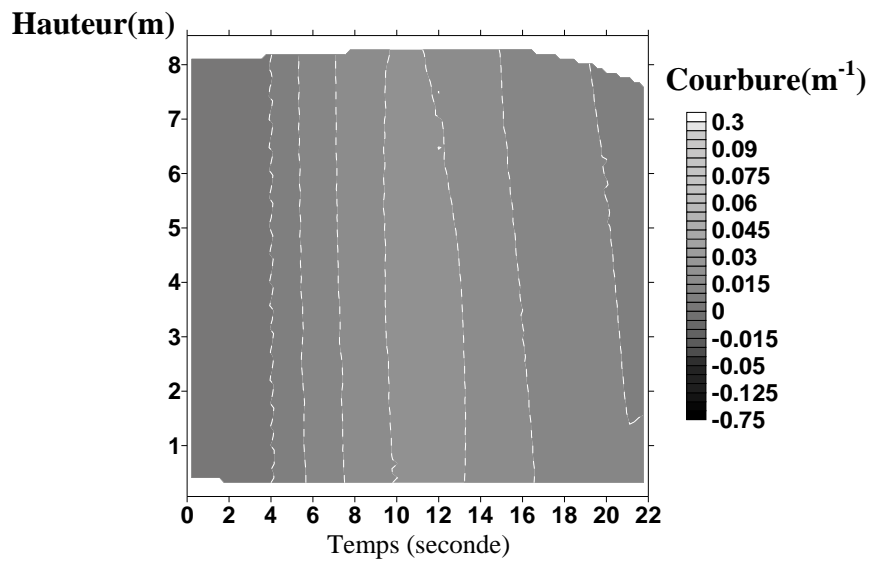


Figure 5 : Cartographie de la courbure d'un I_214

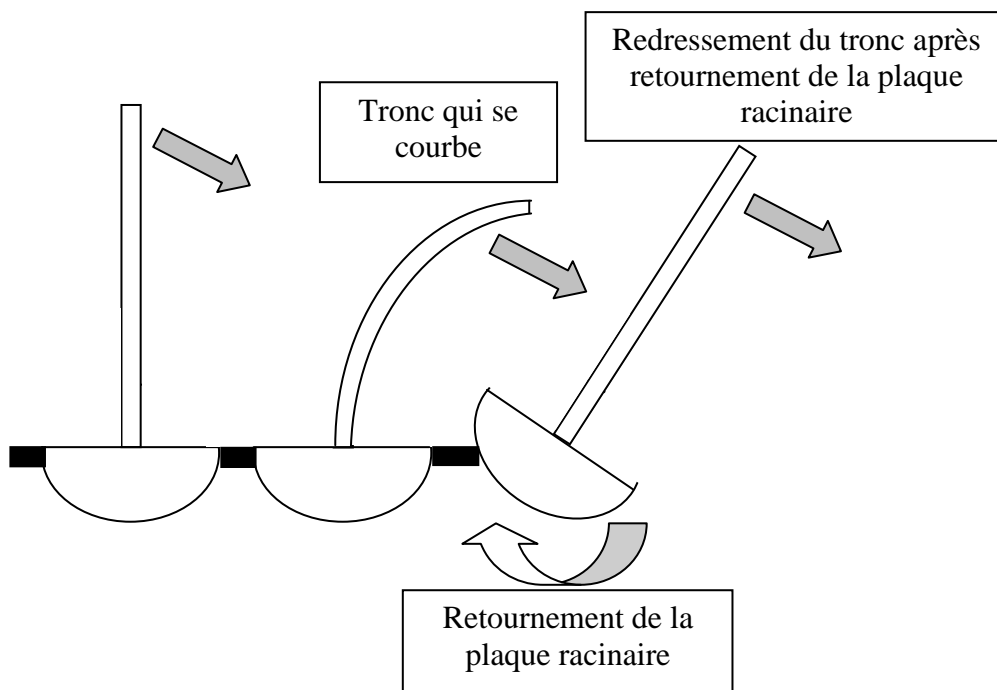


Figure 6 : Représentation du retournement de la plaque racinaire

En ce qui concerne le Dorskamp, on observe une évolution différente de la courbure. Celle-ci ne cesse d'augmenter au cours de l'essai (Figure 7 et 8). De plus, les essais ont montré la présence d'une concentration de courbure située entre la base et 1,50 m (selon l'âge), sur l'ensemble des Dorskamps. Comme précédemment, on peut remarquer que ce type de comportement est en adéquation avec les résultats des déplacements du sol (faible).

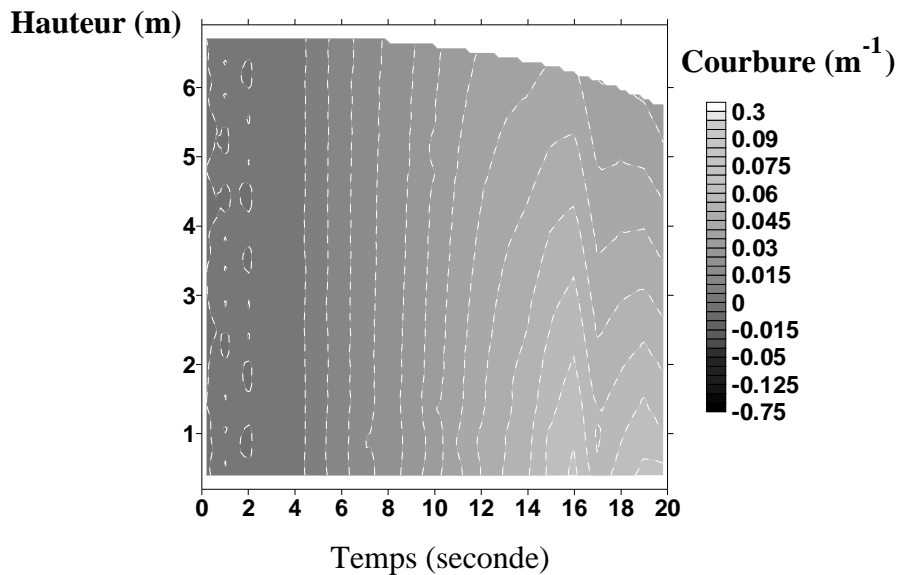


Figure 7 : Cartographie de la courbure d'un Dorskamp.

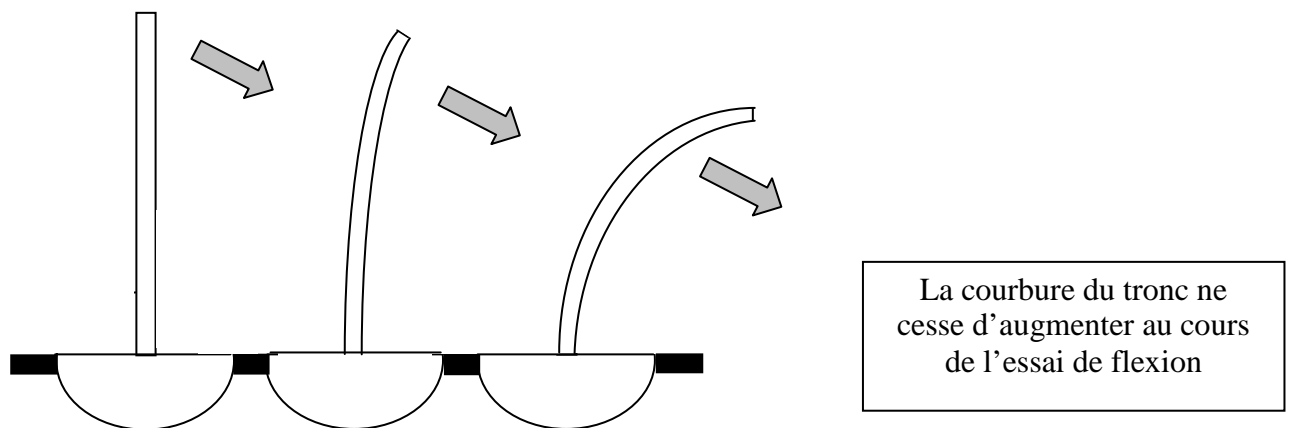


Figure 8 : Représentation de la flexion du tronc

1.3.3. Calcul du centre de rotation

Les jeunes Dorskamps (4 et 8 ans) ont une augmentation continue de leur courbure et elle se trouve localisée entre 1,50m et la base de leur tronc. Dans de telles conditions, l'hypothèse de la verse d'un solide rigide n'est plus respectée. Nous ne pouvons donc pas calculer le centre de rotation. Ce dernier se situe au niveau de la concentration de courbure à une hauteur de l'ordre de 60 cm. Les troncs des jeunes I_214 commence par se courber légèrement de façons globales, puis redevient droit. Dans ce cas, le calcul de position du centre de rotation ne sera valide que lorsque les courbures auront disparu. La profondeur est alors en moyenne de 20 cm.

Les arbres de 16 et 14 ans ont, par contre, une faible courbure, nous pouvons donc calculer les centres de rotations. Nous avons constaté que ceux du Dorskamp sont plus bas que ceux du I_214 (environ 33 cm pour les I_214 de 14 ans et 48 cm pour les Dorskamp de 16 ans).

Lors de la première campagne, on observait aussi une différence entre les Beauprés et les Raspaljes. Elle concernait la stabilité du centre, et sa profondeur. En effet, le Raspalje a un centre de rotation situé plus bas et plus stable que celui du Beaupré.

1.3.4. Calcul des inclinaisons

A partir des positions de deux couples de marqueurs, l'un se trouvant à la base et l'autre en haut de l'arbre, nous avons calculé l'évolution des inclinaisons par rapport à la verticale.

Ce type de mesure permet d'établir certaines conclusions bien que l'on ne puisse pas localiser les concentrations de courbure ou déterminer le mouvement du sol. En effet, pour le I_214 (Figure 9) on constate que les deux inclinaisons sont importantes ce qui montre que le tronc n'est pas fortement courbé. En revanche, pour le Dorskamp (Figure 10), on remarque une importante inclinaison en haut de l'arbre et une faible inclinaison à sa base, dans ce cas, l'arbre est sûrement très courbé. Ces comportements sont en adéquations avec les résultats obtenus aux paragraphes précédents.

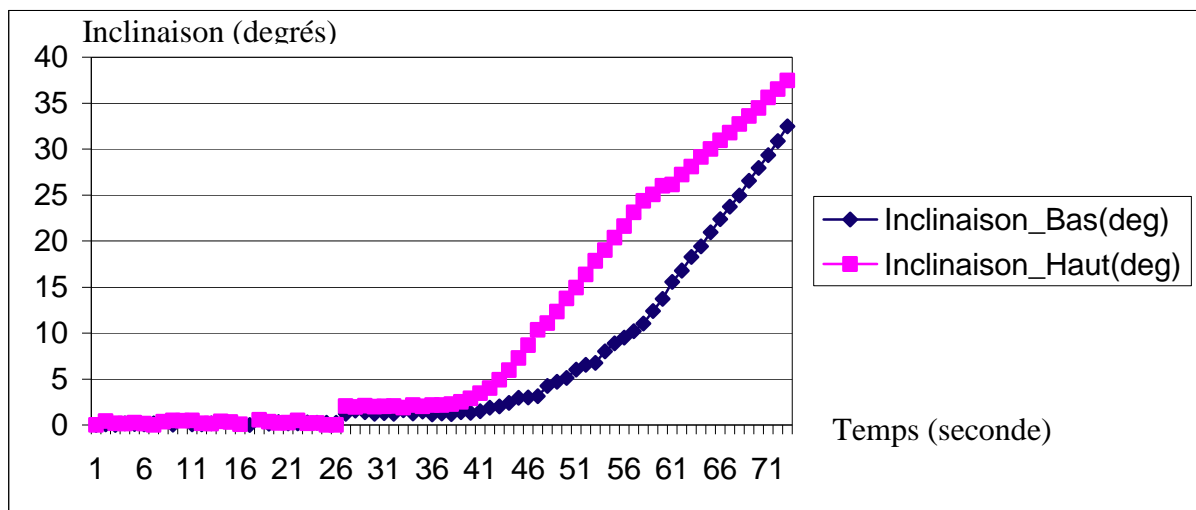


Figure 9 : Evolutions des inclinaisons (degré) à la base et au point d'attache du câble en fonction du temps d'un I_214

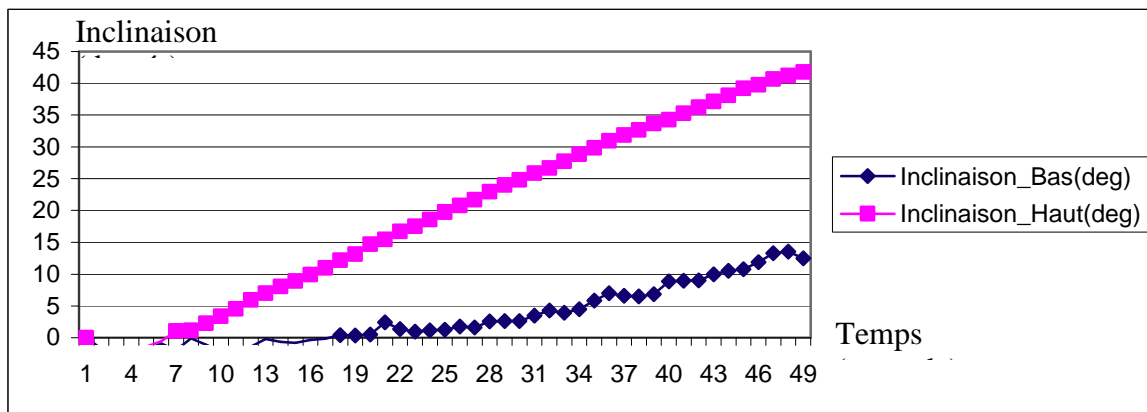


Figure 10 : Evolutions des inclinaisons (degré) à la base et au point d'attache du câble en fonction du temps d'un Dorskamp

1.3.5. Conclusion sur les essais de flexion

Nous avons mis en évidence une différence comportementale entre les deux variétés. En effet le I_214 possède des déplacements importants du sol, une courbure qui passe par une valeur élevée avant de décroître, une position du centre de rotation moins basse que celle du Dorskamp. Cela nous montre que le I_214 à un ancrage peu rigide.

Le Dorskamp quand a lui à un comportement opposé. C'est-à-dire peu de déplacements du sol, une augmentation continue de la courbure (avec une concentration de courbure situé entre la base et 1,50 m selon l'âge), un centre de rotation situé plus bas que le I_214. Cela montre que celui-ci à un ancrage plus rigide.

Le I_214 aura donc tendance à se coucher, alors que le Dorskamp aura tendance à se briser.

En extrapolant nous pouvons même penser que le I_214 se comporte comme un Beaupré et que le Dorskamp se comporte comme un Raspalje.

2. Exploitation des échantillons prélevés sur les systèmes racinaires

2.1 Résultats

Nous avons de nouveau réalisé des essais de flexion trois points pour déterminer les paramètres mécaniques des racines (Figure 14), dans le but de constater d'éventuelles différences entre les résultats obtenus précédemment et ceux de cette année.

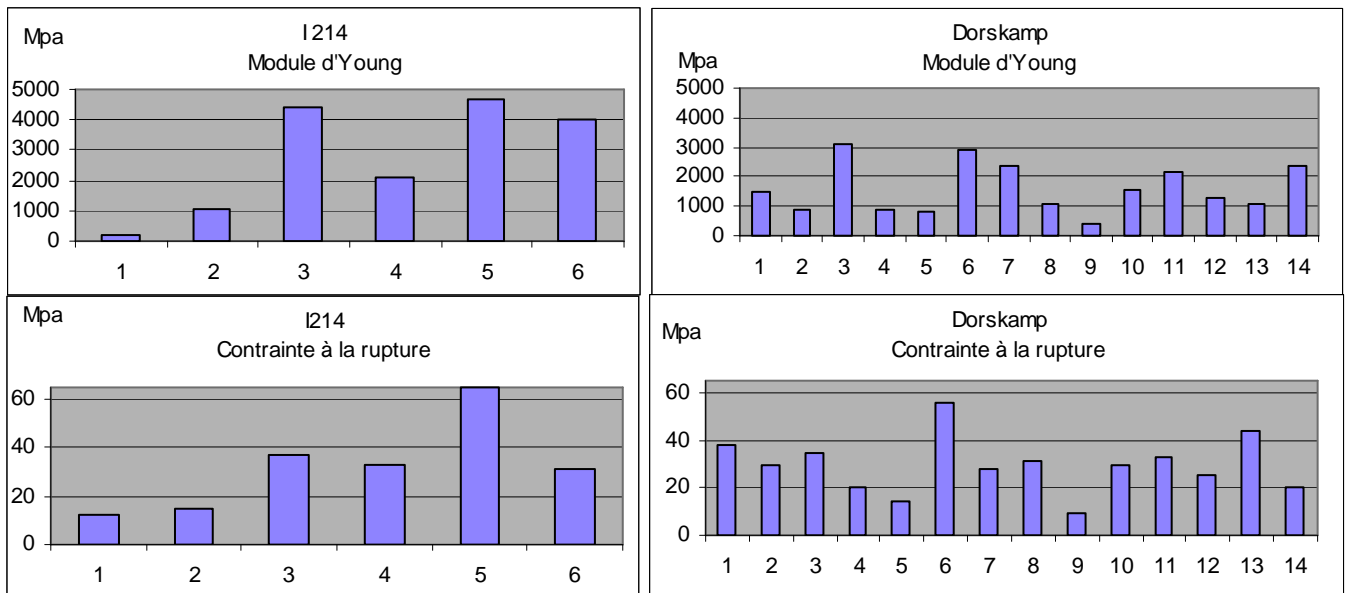


Figure 14 : Résultats obtenus

2.2 Conclusion sur les résultats obtenus

On obtient une valeur moyenne de 2000 MPa pour le module d'Young et de 35 MPa pour la contrainte à la rupture. Nous avons un facteur 2 entre la moyenne des valeurs de l'année dernière (1000 MPa pour le module d'Young et 15 MPa pour la contrainte à la rupture) et celles de cette année. Cependant, compte tenu du caractère biologique du matériau, on ne peut pas affirmer qu'il y a une différence notable entre les valeurs obtenues précédemment et aujourd'hui.

- PARTIE VI -

ETUDE PEDOLOGIQUE DES SITES

VI. 1 – Résultats de 2002

(François Charnet, IDF)

1. Situation des deux fosses pédologiques

Il s'agit de deux parcelles de peupliers de 7 et 13 ans situées en rive droite du Chavenay, à distance moyenne du ruisseau, mais encore dans la zone alluvionnaire,

Le jour de la description, le fond des fosses était sous le niveau d'une nappe libre des sables verts, que l'on peut situer vers 100-120 cm. Cette nappe a limité les investigations en profondeur, mais la base de l'enracinement étant au-dessus de cette limite, on peut penser que c'est sans grande conséquence pour la compréhension des contraintes et la suite de l'étude.

2. Données relevées

Chacune des deux fosses a fait l'objet d'une description morphologique, de prélèvements pour analyse granulométrique, de mesures de résistance sur les parois dans une direction horizontale (pénétrömètre et scissomètre) et de prélèvements d'échantillons non remaniés avec cylindre de 250 cm³, pour calcul de la densité apparente.

Les analyses de terres ont été réalisées par l'INRA d'Arras.

Des contacts avaient été pris avec le laboratoire de Géotechnique des Ponts et Chaussées d'Angers, pour leur confier des tests de laboratoire. Ce projet a été abandonné, le rapport entre le coût de ces tests (plus de 5000€ pour 3 essais de cisaillement et 3 essais triaxiaux)-et leur intérêt n'ayant pas paru intéressant.

3. Description rapide des matériaux géologiques et des sols

Le matériau parental des deux sols est constitué par un substrat sédimentaire, les Sables et marnes vertes du Cénomaniën, recouverts par une couche peu épaisse (quelques décimètres) d'alluvions limono-argileuses remaniant le substrat. Le contact entre ces deux matériaux est souvent souligné par un cailloutis de base (« stone line ») fait de graviers de silex (venant de la craie turonienne des côteaux sus-jacents).

Les sols sont du type sol hydromorphe peu évolué d'apport alluvial, à gley profond. En accord avec la distance au lit du Chavenay, la zone à engorgement permanent (horizon de gley) se situe au delà de 100cm de profondeur, ce qui n'est pas rédhibitoire pour le peuplier.

La texture est limono-argilosableuse ou sablo-argileuse en surface. Dans la fosse 7, une discontinuité majeure est décelable vers 85-90 cm, sous la forme d'un passage à un horizon argileux lourd. Dans la fosse 13, la texture reste à peu près uniforme jusqu'au fond de la fosse. On trouvera une description plus complète de ces deux sols dans les deux fiches jointes.

Les horizons de profondeur sont carbonatés dans la masse (marne de la fosse 7), avec des efflorescences ou des plages isolées dans les horizons de moyenne profondeur.

A la base de l'enracinement, les racines moyennes observées sur chablis montrent des encroûtements calcaires nets, d'origine secondaire, ressemblant parfois à des manchons.

4. Les paramètres physiques

Chaque horizon a fait l'objet de 5 mesures au pénétromètre, avec un cône de calibre 2. Ceux de la fosse 13 ont été en plus échantillonnés pour calcul de la densité apparente. Les résultats sont représentés sous forme de deux graphiques ci-joints.

5. *Commentaire et synthèse des résultats*

Les variations de la densité et de la résistance à la pénétration en fonction de la profondeur (voir graphiques), mis en regard des caractères morphologiques des horizons, appellent les commentaires suivants :

La densité apparente augmente en profondeur dans la fosse 13. C'est un fait dominant – sinon constant- dans les sols forestiers et même dans les sols en général, sauf exception. Toutefois les valeurs restent faibles (maximum inférieur à 1,5 en profondeur). Si on avait échantillonné plus profond, vers 100-150 cm, on aurait sans doute trouvé des valeurs proches de 1,8.

Pour ce qui concerne la résistance mécanique des horizons à la pénétration, exprimée dans les tableaux et les graphiques en N/cm^2 ($1N/cm^2 = 10^4 Pa = 0,1 bar$), ses variations ont une allure identique dans les deux fosses : elle augmente depuis la surface jusqu'à mi-profondeur, en accord avec les variations de la densité apparente, puis baisse à nouveau en profondeur.

La contradiction de ces faits est levée quand on tient compte de l'humidité des horizons. Les horizons sont à l'état frais (proche de la capacité au champ) jusqu'à mi-profondeur, puis sont plus humides en profondeur, dans la frange capillaire qui surmonte la nappe. C'est cette humidité qui abaisse la résistance à la pénétration. A taux d'humidité égal, on aurait vraisemblablement observé un accord plus complet entre ces deux paramètres.

Il semble que la résistance au cisaillement mesurée au scissomètre (R_s , en kg/m^2) ne présente pas cet inconvénient et soit – sous réserve de vérification – un paramètre plus robuste à l'égard des variations d'humectation du sol que la résistance mécanique. Dans la fosse n°7, la valeur augmente continûment de la surface vers la profondeur.

L'enracinement, si on en juge d'après les chablis et les fosses, subit une première limitation nette vers 70 cm, où les densités apparentes restent assez faibles (moins de 1,5), en tout cas pas assez pour être la cause unique du blocage de la prospection en profondeur (en forêt, ce sont plutôt de valeurs de 1,8 qui semblent limitantes, mais il est vrai que l'on ne dispose pas de seuils pour chaque essence).

Il faudrait donc admettre que le niveau d'engorgement hivernal, évidemment plus haut que le niveau de nappe observé en avril, soit la contrainte de l'enracinement par anoxie.

Pour confirmer cette interprétation, il faudrait idéalement :

- interroger les spécialistes ou la littérature pour s'assurer que des valeurs de densité apparente inférieures à 1,5 ne puissent pas, à elles seules, constituer une limite physique pour l'enracinement du peuplier,

- vérifier si en hiver (vers la mi-février), le niveau maximal de la nappe ne remonte pas jusqu'à 50cm-60cm de la surface. Il faudrait disposer d'un piézomètre ou faire quelques sondages à cette période.

En attendant cette confirmation (qui expliquerait aussi les encroûtements calcaires autour des racines), la morphologie du sol (renforcement net des caractères hydromorphes à cette profondeur) rend plausible cette hypothèse...

- d'un point de vue méthodologique, cette étude confirme l'intérêt des mesures au pénétromètre (rapides, de résultat direct), par rapport à celles de la densité apparente (plus longues et qui demandent un aller-retour terrain-laboratoire), mais en situe aussi les limites (résultat dépendant de l'humidité de l'échantillon). En l'état, faute d'avoir affaire à des sols d'humidité égale sur toute leur profondeur, elles ne dispensent pas des mesures de densité apparente, et encore moins des notations d'hydromorphie.

Tableau 1 – Variation des caractères physiques de la fosse 7

Horizon	Profondeur (cm)	Texture	Résistance à la pénétration Re en N/cm ²	Ecart-type de Re	Résistance au cisaillement Rs en kg/cm ²	Ecart-type de Rs
Âp	10	SLA	75	10	0,35	0,05
AB (g)	40	SLA	90	15	0,44	0,07
2B (g)	65	SA	130	15	0,77	0,10
2Bg	90	Alo	85	15	0,84	0,10

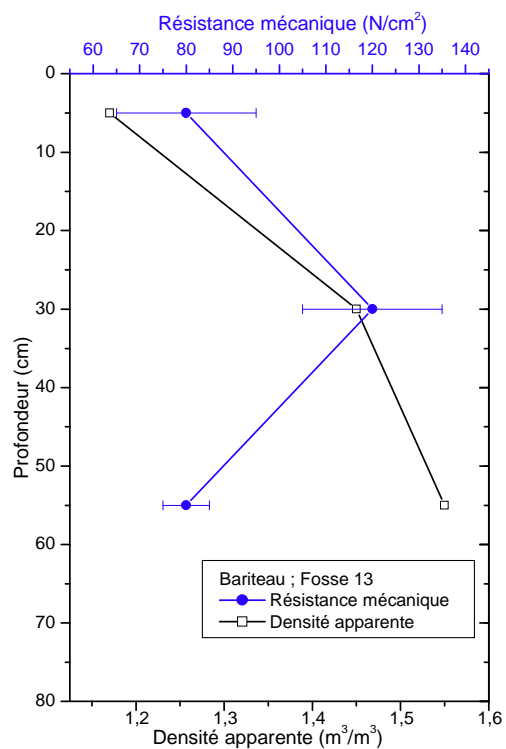
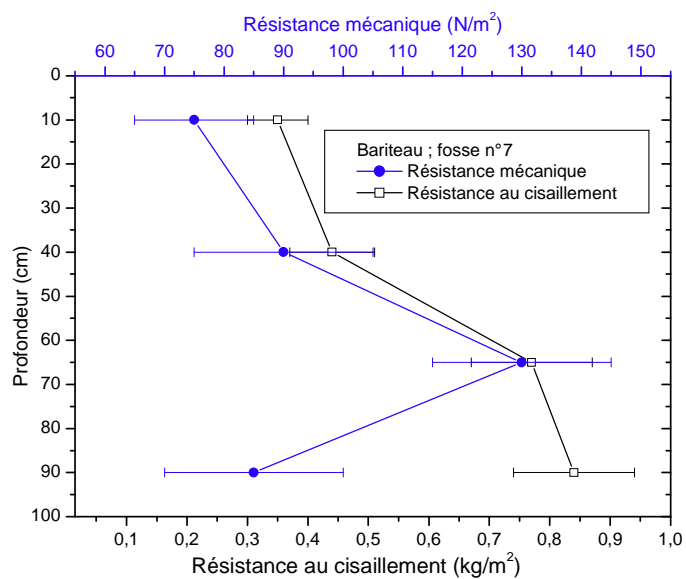
Tableau 2 – Variation des caractères physiques de la fosse 13

Horizon	Profondeur (cm)	Texture	Re (N/cm ²)	Ecart-type (Re)	Densité apparente	Calcaire total (%)
Ap	5	LAS	80	15	1,17	20,7
B(g)	30	LAS	120	15	1,45	5,5
Bg	55	LAS	80	5	1,55	3,5
2BCg	70	LAS	-	-	-	39,7
(G)	100	SA?	-	-	-	10,9

Tableau 3 – Granulométrie de la fosse 13, sans et **avec** décarbonatation préalable (g/100g)

Horizon	Argile	Limon fins	Limon grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Matière organique (%)
Ap	23,7 / 20,1	12,6 / 4,8	7,0 / 3,7	17,1 / 13,6	39,6 / 36,5	5,2
B(g)	20,9 / 16,2	5,8 / 4,4	4,3 / 3,2	21,5 / 15,2	47,5 / 55,4	0,7
Bg	22,7 / 18,2	5,5 / 6,1	4,0 / 3,5	16,9 / 14,6	50,9 / 54,1	0,6
2BCg	22,4 / 14,8	13,4 / 2,6	4,0 / 1,8	19,0 / 15,1	41,2 / 25,3	0,1
(G)	16,7 / 14,7	5,1 / 1,4	1,4 / 0,9	20,8 / 15,2	56,0 / 56,8	0,0

GRAPHIQUES POUR LES FOSSES PEDOLOGIQUES



VI. 2 – Résultats de 2003

(François Charnet, IDF)

1. Rappel des investigations conduites en avril 2002 dans le domaine de Bariteau, à Beuxes (86)

- 2 fosses pédologiques ont été ouvertes en vallée du Chavenay, sous des peupliers respectivement de 7 et 13 ans, chacune étant bordée de parcelles de clones 'Beaupré' et 'Raspalje'. Outre la description des caractères morphologiques, les paramètres analysés sur les fosses sont :
 - Granulométrie en 8 fractions,
 - Carbone organique en ‰ (d'où Matières organiques en %),
 - Calcaire total en %,
 - Humidité résiduelle (non reproduite),
 - Les paramètres physiques et mécaniques
 - densité apparente mesurée avec des cylindres à bords tranchants,
 - résistance mécanique R_m testée avec un pénétromètre (5 mesures par horizon), en MPa. (1 Mpa = 100 N/cm² = 10 bar = 10,2 kg/cm²)
 - résistance au cisaillement R_{cs} , mesurée au scissomètre (5 mesures par horizon), en kilopascals (kPa)

2. Rappel des investigations conduites en mai 2003 à Verdun-sur-Garonne (82)

- 4 fosses profondes ouvertes dans les alluvions modernes de la Garonne (plaine d'inondation ou lit majeur), correspondant à deux couples : I214 (9 et 14 ans) ; Dorskamp (8 et 16 ans),
- L'ouverture de fosses dans les stades les plus jeunes n'a pas été jugée pertinente, l'enracinement n'étant pas encore en place. Seuls les âges de 7-8 ans et 13-14 ans ont été retenus.
- Outre une description morphologique de base, la caractérisation des sols a insisté sur les caractères physiques en rapport avec le thème de l'étude, les autres caractères (notamment chimiques) de ces sols étant largement connus grâce à des études antérieures dans cette propriété dues à Pierre Gonin (CETEF Garonnais).
- Les analyses physiques, dont les résultats ont été consignés dans des tableaux Excel, sont identiques à celles relevées à Bariteau l'année précédente, mais ont été prises de façon plus systématique, car l'absence de cailloux a rendu les mesures moins difficiles.
- Par ailleurs, l'enracinement observable sur les faces de fosse a été noté par référence à une grille de 10 x 10 cm, en séparant racines grosses moyennes et fines. Pour chacune de ces catégories, une classe de densité (en Nbre de racines/dm²) a été estimée.

3. Interprétation des résultats

1. Homogénéité pédologique des séries

La description des fosses en avril et mai a révélé des sols alluviaux jeunes, peu différenciés sur le plan morphologique.

On note une différence assez nette entre les sols des deux localités, ce qui obère la comparaison entre clones. D'un côté (Bariteau), des sols assez lourds et hydromorphes, à charge grossière locale en cailloux calcaires, de l'autre un ensemble assez homogène de sols

profonds et assez sains (à Verdun-sur-Garonne la nappe n'a été observée que dans la fosse D16, à 2,3 m de profondeur.)

A Verdun, les sols sont limono-sableux (à sables fins), avec parfois quelques nuances en profondeur.

S'agissant de sols alluviaux, il existe entre sols d'une même série d'inévitables différences de détail (passées ou laminations plus argileuses, par exemple) héritées de la géodynamique alluviale.

Dans l'ensemble, l'homogénéité au sein de la série de Verdun est bonne et autorise les comparaisons. On n'en dira pas autant de la série de Bariteau, où voisinent deux sols dérivant peu ou prou du même matériau parental, mais qui présentent des différences notoires de texture et d'économie en eau.

On retiendra aussi que l'état d'humidité sur le terrain était assez homogène, et proche de la capacité au champ (état 'frais'), ce qui facilite les comparaisons, sauf en profondeur, où une plus forte humidité des horizons fait baisser les résistances (R_m plus que R_c , du reste).

2. Relations entre densité apparente et résistance mécanique (Fig. 2).

Ces relations sont assez médiocres, la densité apparente variant peu dans ces sols, alors que la résistance mécanique varie beaucoup et permet de différencier deux grands ensembles lithologiques et régionaux : Beuxes et Verdun/Garonne. R_m est inférieur à 1,5 MPa à Beuxes et supérieur à 2.25 MPa à Verdun/Garonne. La teneur en sables grossiers des sols de Beuxes en serait l'explication la plus probable.

La densité apparente varie moins, mais il faut ici se rappeler que la densité apparente « sèche » est un paramètre de laboratoire, assez hétérogène sur le terrain : on manque donc manifestement de répétitions.

Dans l'ensemble, sauf exception pouvant s'expliquer par l'humidité (da est mesurée "sèche"), R_m augmente avec da, mais selon des modalités complexes, où on ne peut dégager une relation quantitative simple.

Enfin, on remarque que dans les horizons de surface des profils de Verdun-sur-Garonne, R_m et R_c atteignent des valeurs relativement plus fortes dans l'horizon de surface A_p , bien que la densité apparente soit faible. Ce phénomène, qui illustre la complexité des relations évoquée plus haut, ne se retrouve pas à Bariteau. On l'attribue à la texture limoneuse et sableuse fine, favorable à la prise en masse et au durcissement sous l'influence du dessèchement de surface (les sols ont été décrits en mai). C'est une caractéristique circonstancielle dont il n'a pas été tenu compte dans la typologie esquissée en IV.

3. Relations entre enracinement fin et densité apparente (Fig.3).

Le fort enracinement fin de l'horizon de surface A_p correspond souvent à une faible densité apparente (due à une forte porosité structurale), mais où l'enracinement est à la fois cause et effet. En dessous, da augmente en profondeur alors que l'enracinement fin et moyen baisse généralement en intensité. Toutefois, si da, R_m (et souvent R_c) baissent à nouveau en profondeur (ex. D-8 et I-14), alors on assiste à une remontée de la densité d'enracinement. Il y a donc là aussi des relations "en tendance", que viennent compliquer les variations de taux d'humidité au sein des profils. Sur d'autres graphiques, la relation n'est pas nette, mais il est vrai que les valeurs de da sont dans l'ensemble faibles, non contraignantes (da = 1,2-1,5 ; alors que 1,8 est souvent présentée dans la littérature comme une valeur-seuil pour la pénétration des racines fines.).

4. Relations entre enracinement fin et résistance mécanique (Fig.1 ; Fig.4).

Elles sont plus nettes que les précédentes, mais inconstantes. A Bariteau, la relation antagoniste est nette sur le profil B-7. A Verdun-sur-Garonne, sur D8, on note aussi une assez

nette relation inverse. Sur I9, l'enracinement RacM+RacF régresse quand Rm croît. Enfin, sur I-14, la baisse de Rm en dessous de 1,7 MPa à partir de 120 cm de profondeur provoque une augmentation des racines fines et moyennes..

5. Essai d'approche multifactorielle.

Bien que des relations binaires de nature antagoniste aient pu être décelées entre l'enracinement fin et moyen et les indicateurs de compacité (da) de résistance mécanique (Rm) et de cohésion (Rc), ces essais d'interprétation monofactorielle sont difficiles. En fait, il faut avoir à l'esprit que les paramètres physiques de ces sols alluviaux sont globalement peu contraignants, que ce soit les densités apparentes, très inférieures aux valeurs seuils de la littérature (da = 1,8), ou à un moindre degré les résistances mécaniques (Rm seuil = 4 MPa).

Dans ces conditions, ce sont d'autres facteurs qui contrôlent par défaut l'intensité de l'enracinement : au premier chef le taux de MO (pour son influence sur la réserve utile en eau et la teneur en nutriments), accessoirement la fraîcheur (humidité rémanente de profondeur).

Vu sous ces aspects, on observe un net « effet humus » qui relie l'intensité de l'enracinement au taux de MO (fort de 2-3% en surface (Ap et C1), puis décroissant assez vite en profondeur), avec des pics de profondeur quand la MO revient à des taux élevés (voir C2-C3 en D8). Dans D16, le faible taux d'enracinement en surface est associé aussi à de faibles teneurs en MO.

4. Enseignements méthodologiques et théoriques

A la lumière des premiers résultats obtenus, l'étude a fait apparaître des pistes intéressantes, mais aussi quelques carences méthodologiques, dont il faudra tenir compte pour la suite des investigations, comme le manque de répétitions (da).

- Il faut donc multiplier les répétitions de densité apparente (au moins 3, 5 serait mieux), quitte à limiter le nombre de fosses renseignées pour ce paramètre.

- Ne pas oublier de commander au laboratoire l'humidité « terrain » (le jour de la mesure), afin de pouvoir interpréter d'éventuels écarts de valeurs des paramètres physiques. L'eau joue le rôle de lubrifiant, abaissant les forces internes de frottement, ce qui influence à la baisse Rm et Rcs, pour un même matériau.

- Soigner particulièrement le protocole et l'observation des densités d'enracinement sur les fosses, en utilisant des grilles à maille fixe.

- D'un point de vue pratique, la résistance mécanique, facile et rapide à mesurer sur le terrain, apparaît comme une quantification intéressante de la sensation de « compacité du sol », et comme un des paramètres physiques les plus pertinents de l'intensité de l'enracinement, conjointement avec les facteurs « positifs » tels que la texture ou le taux de matières organiques.

- *A contrario*, la résistance au cisaillement, qui varie beaucoup moins dans les sols étudiés, dépend aussi – mais dans une moindre mesure de l'état d'humidité des horizons. Elle relève moins d'une problématique d'enracinement que de celle de la cohésion du sol comme support et de la stabilité de la motte racinaire.

5. Essai de restitution de la variété des cas étudiés sous la forme d'une typologie simplifiée pouvant servir de support à la modélisation

On a vu que les différences fortes entre les sols des deux sites géographiques interdisaient une comparaison directe entre peupliers inter-américains de Bariteau et peupliers euraméricains de Verdun-sur-Garonne, "l'effet sol" étant difficile à défalquer.

Il faut donc restituer ces différences sous une forme simplifiée et synthétique pour en tenir compte dans les essais de modélisation. Dans les tableaux qui suivent, les valeurs de résistance sont données pour un état d'humidité proche de la capacité au champ.

A Bariteau, on considère, sur la base de la connaissance des sols du massif, que le profil 7 est le plus représentatif (du reste, Rm et Rc varient peu d'un profil à l'autre). Le sol type est donc résumé ainsi :

Horizon (prof)	Texture simplifiée	da	Rm (en Mpa)	Rc (en kPa)
Ap (0-30cm)	SLA	1,2	0,8	40
Bg (30-80 cm)	SA	1,4	1,4	80
Cg (80-120)	Alo *	1,6	0,8	80
R (120 -)	Marnocalcaire			

* Alo = argile lourde (Arg>40%)

Les sols de Verdun sont bien résumés par le profil-type suivant

Horizon (prof)	Texture simplifiée	da	Rm (en Mpa)	Rc (en kPa)
Ap (0-20 cm)	LSf	1,2	2,5	50
C1 (20 -100)	LSf	1,3	2,5	60
C2 (100-150)	LSf	1,5	3	40
C3 (g) (150-)	LSf	1,2	3	40

Sol hydromorphe complexe de Beuxes (86)

Sol peu différencié d'apport alluvial de Verdun-sur-Garonne (82)

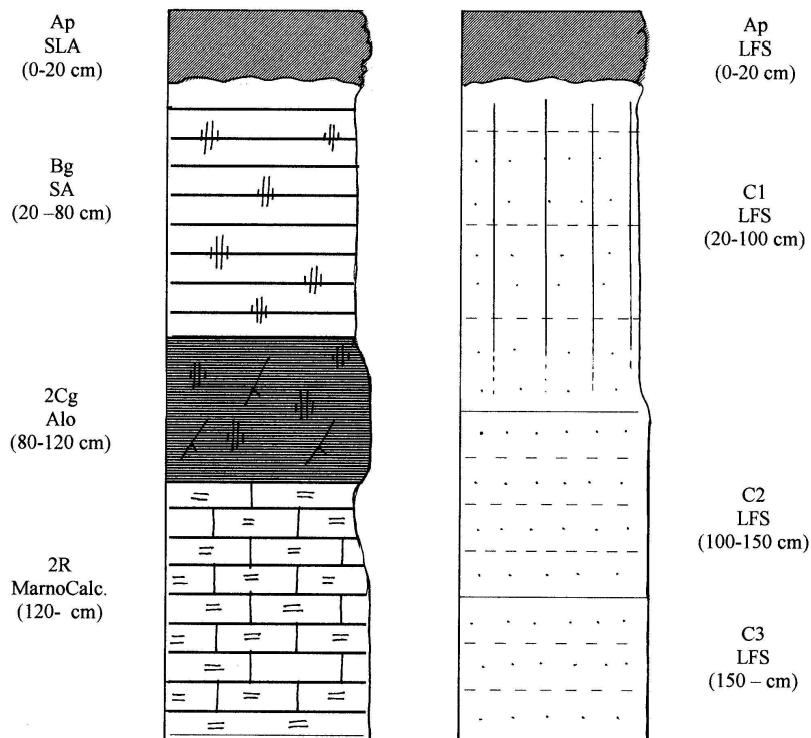


Figure 1 - Peupleraies de Bariteau à Beuxes (86) :
Relations enracinement - résistance mécanique

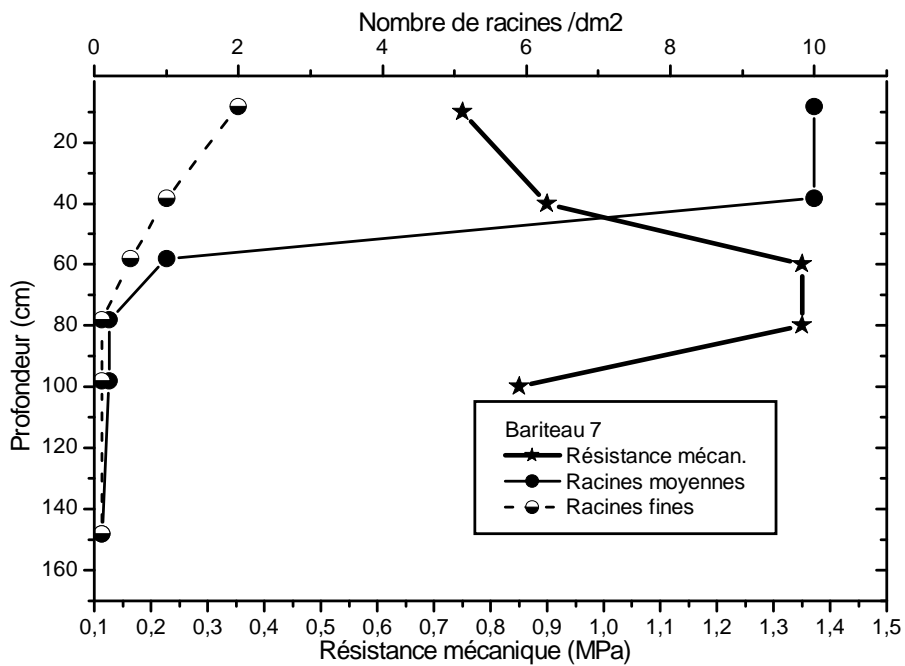
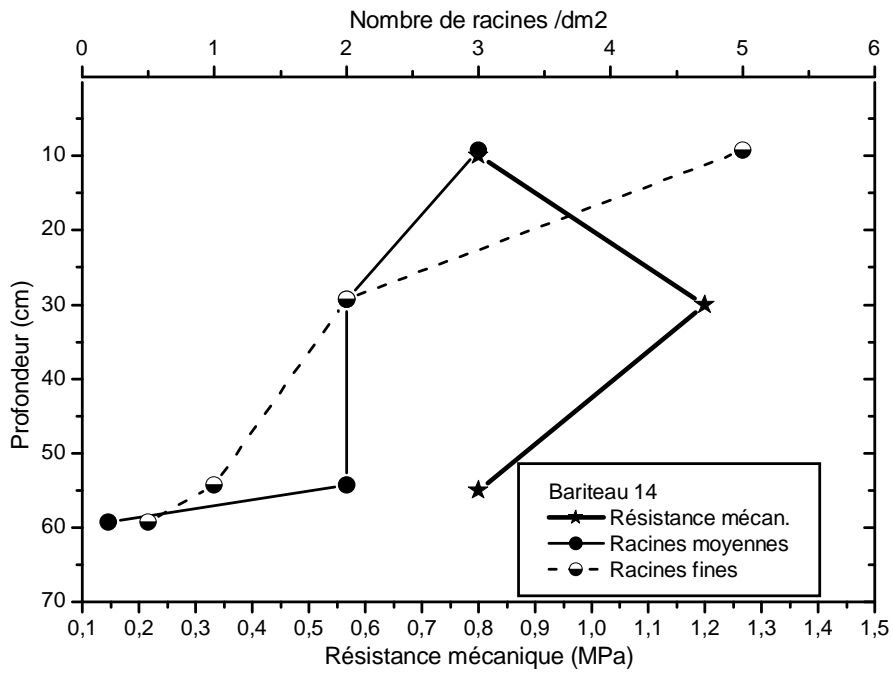


Figure 2 - Peupleraies de Verdun-sur-Garonne : Densité apparente et Résistance mécanique

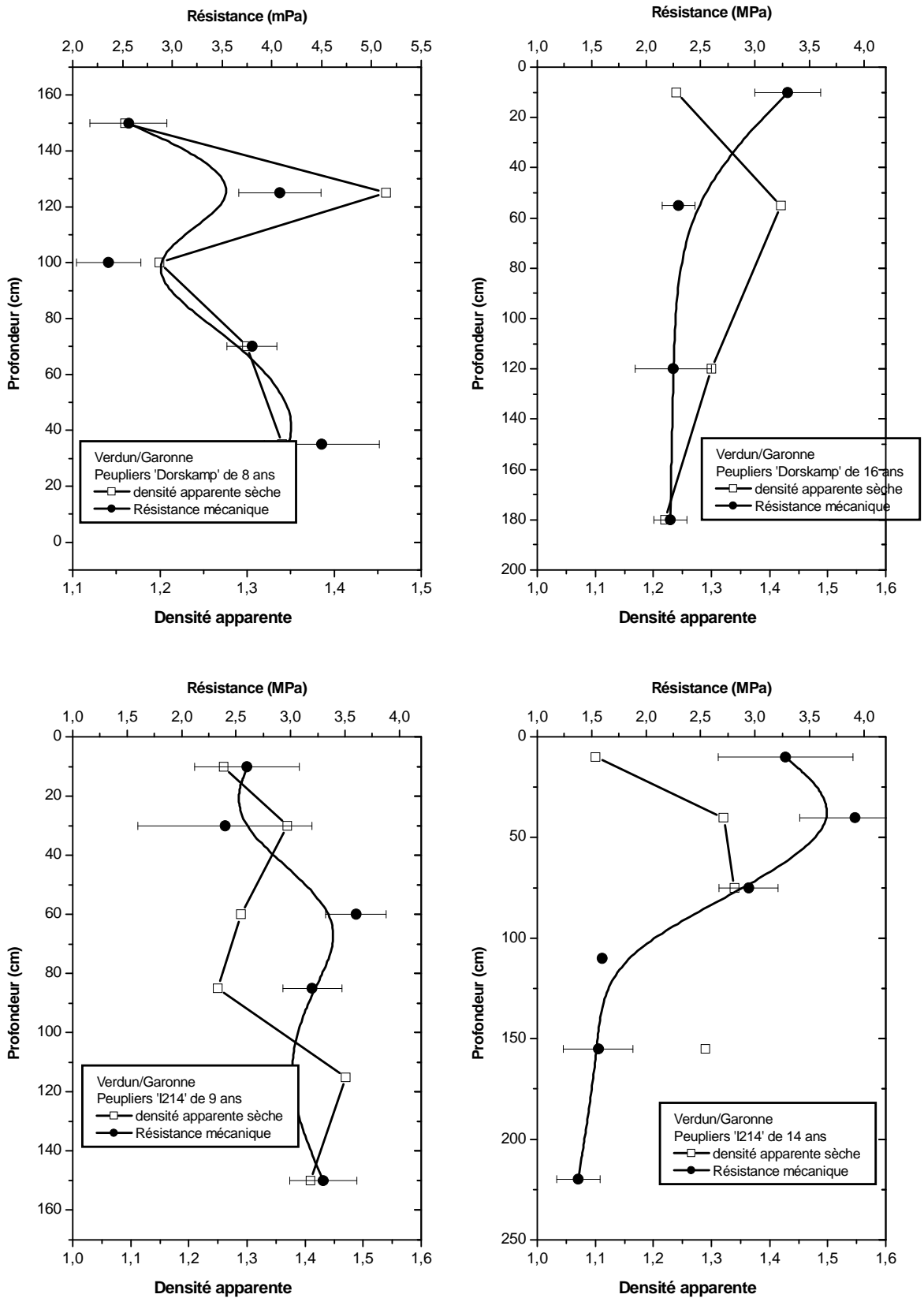


Figure 3 : Peupleraies de Verdun-sur-Garonne : Relations enracinement fin - densité apparente

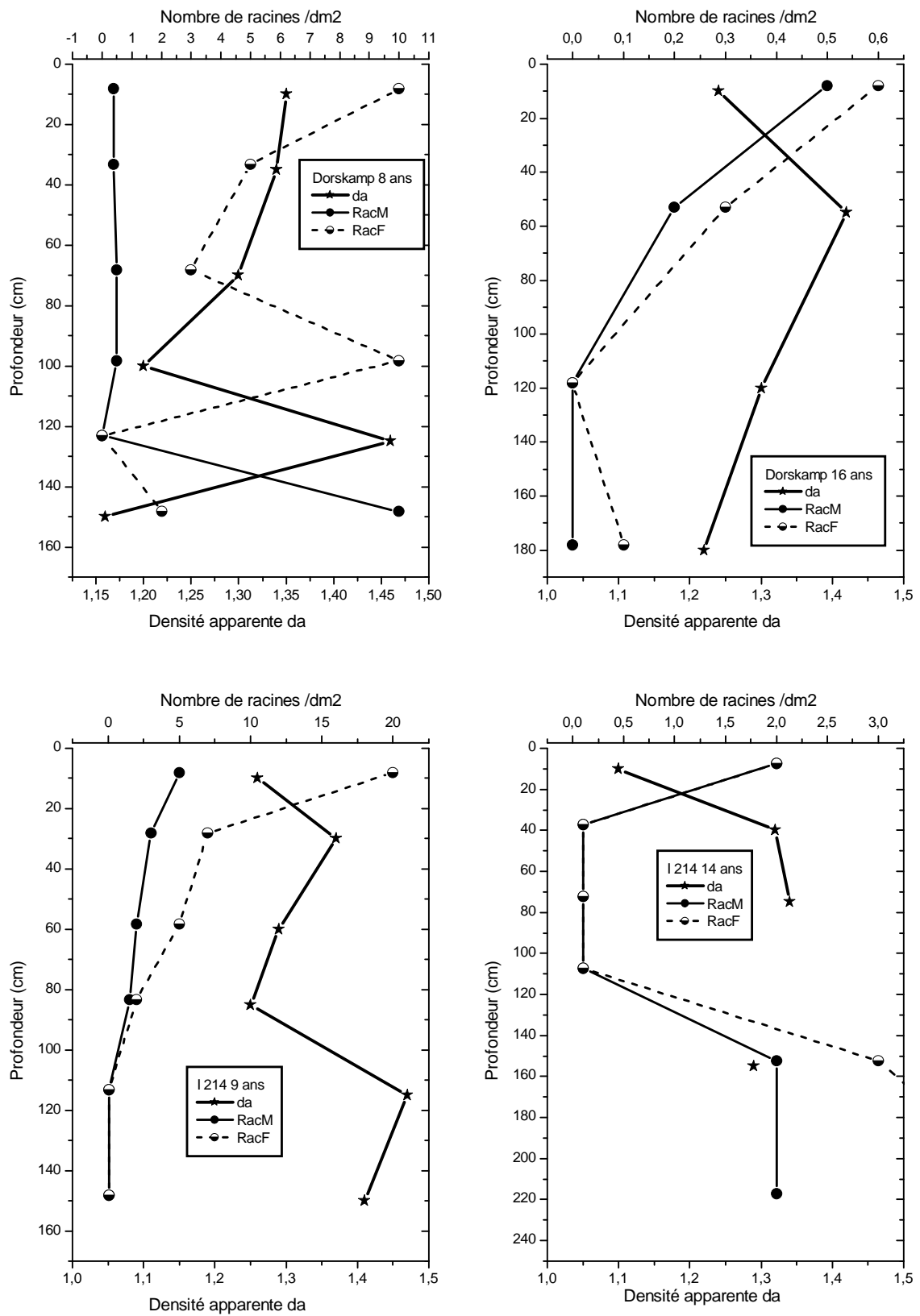
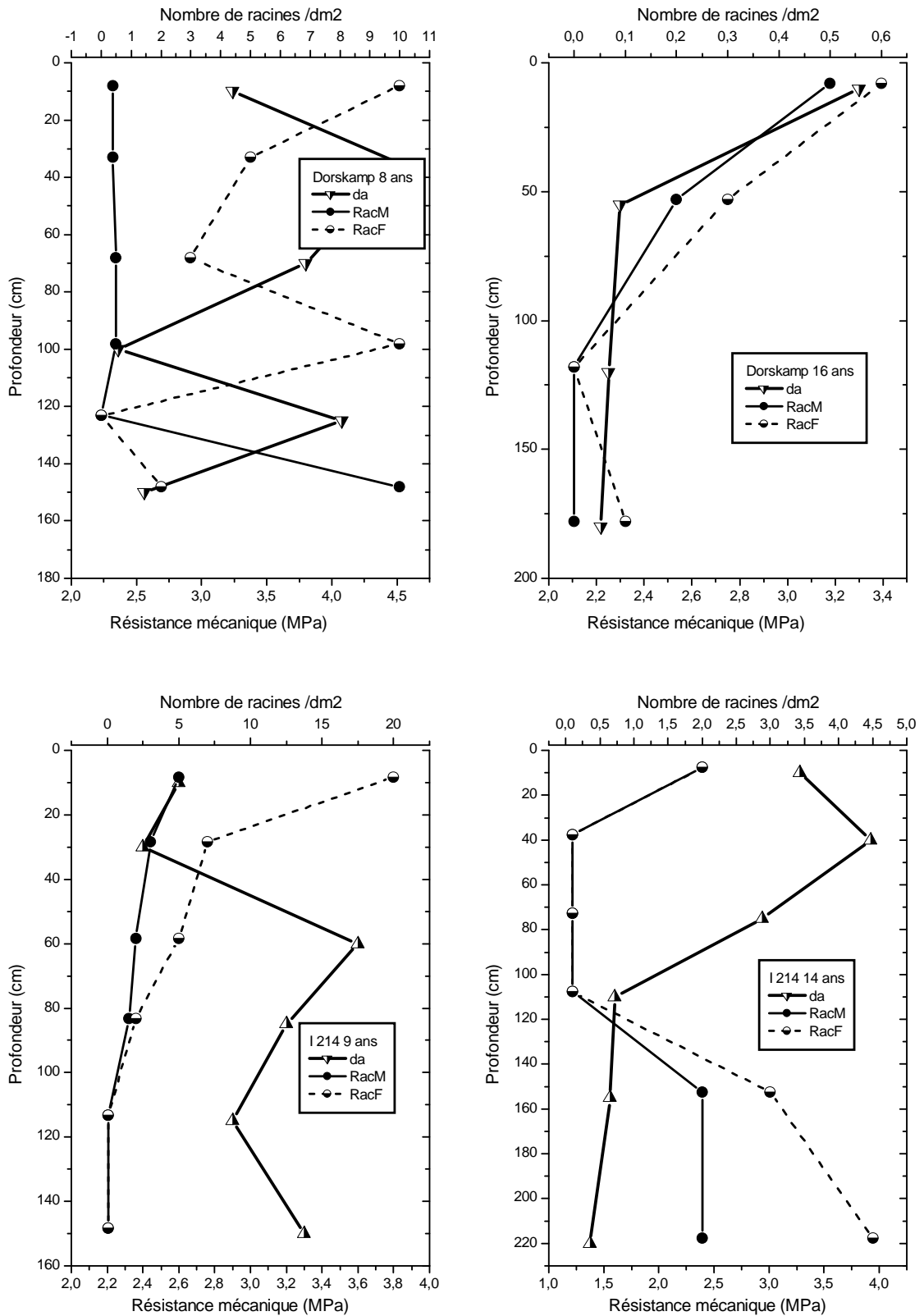


Figure 4 : Peupleraies de Verdun-sur-Garonne : Relations enracinement fin - résistance mécanique



Bariteau (Beuxes, 86) Peupleraie de 7 ans (Beaupré et Raspalje)

Etat d'humidité: Frais à très frais de 0 à 90 cm ; humide dessous

<i>Limites des horizons</i>			<i>Caractères physiques</i>					<i>Enracinement</i>		
Horizons	Prof. (cm)	Centre	da	Rm	E(Rm)	Rcs	E(Rcs)	Rac G	Rac M	Rac F
Ap	SLA	10		0,75	0,01	35	5	<0,5	2,0	10,0
AB	SLA	40		0,9	0,015	44	7	<0,5	1,0	10,0
2B1g	SA	60		1,35	0,015	77	10	0,0	0,5	1,0
2B2g	SA	80		1,35	0,015	77	10	0,0	0,1	0,2
2C1g	Alo	100		0,85	0,015	84	10	0,0	0,1	0,2
2R	Calc.	150+						0,0	0,1	0,1

Bariteau (Beuxes, 86) ; sol alluvial ; peupliers 14 ans ; (Beaupré et Raspalje)

Etat d'humidité le 10/04/2002 : Frais de 0 à 7 cm ; humide en dessous ; nappe vers 100 cm

<i>Limites des horizons</i>			<i>Caractères physiques</i>					<i>Enracinement</i>		
Horizons	Prof. (cm)	Centre	da	Rm	E(Rm)	Rcs	E(Rcs)	Rac G	Rac M	Rac F
Ap	--20	10	1,17	0,8	0,15			0,5	3,0	5,0
B1(g)	--45	30	1,45	1,2	0,15			0,2	2,0	2,0
B2g	-- 65	55	1,55	0,8	5			<0,5	2,0	1,0
2BCg	--75	60						<0,5	0,2	0,5
3Cg	-- 100	90								
4R	150+ (?)									

<i>Composition granulométrique (%)</i>						<i>Caractères chimiques</i>		
Texture	Arg	LF	LG	SF	SG	Corg %o	MO%	Calc t%
SAL	23,7	12,6	7,0	17,1	39,6	30,00	5,2	20,7
SAL	20,9	5,8	4,3	21,5	47,5	4,00	0,7	5,5
SAL	22,7	5,5	4,0	16,9	50,9	3,40	0,6	3,5
SAL	22,4	13,4	4,0	19,0	41,2	0,60	0,1	39,7
SLA	16,7	5,1	14,0	20,8	56,0	0,20	0,0	10,9

Verdun-sur-Garone (82) ; sol alluvial ; peupliers 'Dorskamp' 8 ans

Etat d'humidité le 13/05/2003 : Frais de 0 à 140 cm ; très frais de 140 à 165 cm, puis humide

Limites des horizons			Caractères physiques					Enracinement		
Horizons	Prof. (cm)	Centre	da	Rm	E(Rm)	Rcs	E(Rcs)	Rac G	Rac M	Rac F
Ap	--20 cm	10	1,35	3,24	0,35	56	13	0,1	0,4	10,0
C1	--50 cm	35	1,34	4,5	0,58	61	9	0,1	0,4	5,0
C2	-- 90 cm	70	1,3	3,8	0,25	47	6	0,1	0,5	3,0
C3	-- 110 cm	100	1,2	2,36	0,32	34	3	0,0	0,5	10,0
C4	-- 140 cm	125	1,46	4,08	0,41	<0	--	0,0	0,0	0,0
C5	-- 165 cm	150	1,16	2,56	0,39	29	2	0,0	10,0	2,0
C6	-- 200+cm							0,0	10,0	2,0

Composition granulométrique (%)								Caractères chimiques		
Arg	LF	LG	SFF	SF	SM	SG	SGG	Corg %o	MO%	Calc t%
18,9	17,7	21,0	36,8	18,0	34,0	2,0	2,0	12,5	2,15	7
17,8	18,4	22,6	25,0	13,6	2,1	0,3	0,2	7,4	1,27	7,5
17,3	20,9	18,9	37,8	2,6	2,3	2,0	0,0	10,7	1,84	7,6
16,4	18,6	21,5	23,1	14,9	4,0	1,1	0,4	10	1,72	9,4
2,7	0,4	0,4	2,6	0,8	60,5	30,5	2,1	0,8	0,14	1,1
14,1	19,3	19,0	20,8	19,9	6,6	0,2	0,1	13,4	2,3	13,3

Verdun-sur-Garonne (82) ; sol alluvial ; peupliers 'Dorskamp' ; 16 ans

Etat d'humidité le 13/05/2003 : frais de 0 à 85 cm, très frais à humide, puis nappe à 230 cm.

Limites des horizons			Caractères physiques					Enracinement		
Horizons	Prof. (cm)	Centre	da	Rm	E(Rm)	Rcs	E(Rcs)	Rac G	Rac M	Rac F
Ap	-- 25 cm	10	1,24	3,30	0,30	70	12	<0,5	0,5	0,6
C1	-- 85 cm	55	1,42	2,30	0,15	67	10	<0,5	0,2	0,3
C2	-- 160 cm	120	1,30	2,25	0,35	62	7	0,0	0,0	0,0
C3	-- 200 cm	180	1,22	2,22	0,15	52	5	0,0	0,0	0,1
C4	-- 230+ cm							0,0	0,0	0,0

Composition granulométrique (%)								Caractères chimiques		
Arg	LF	LG	SFF	SF	SM	SG	SGG	Corg %o	MO%	Calc t%
22,1	29,2	25,7	19,0	1,7	2,0	0,1	0,2	11,90	2,05	9,20
22,7	33,7	28,4	11,1	2,4	0,8	0,3	0,6	6,50	1,12	9,90
19,4	30,6	31,2	15,9	1,6	0,8	0,3	0,2	4,20	0,72	9,20
28,1	33,3	24,4	9,0	2,8	1,0	0,9	0,5	5,30	0,91	10,10

Verdun-sur-Garonne ; sol alluvial ; peupliers I-214, 9 ans

Etat d'humidité le 12/05/2003 : frais à assez sec de 0 à 130 cm ; très frais jusqu' à 200 cm.

Limites des horizons			Caractères physiques					Enracinement		
Horizons	Prof. (cm)	Centre	da	Rm	E(Rm)	Rcs	E(Rcs)	Rac G	Rac M	Rac F
Ap	--20 cm	10	1,26	2,6	0,48	26	7	0,2	5,0	20,0
C1	--45 cm	30	1,37	2,4	0,8	59	4	0,2	3,0	7,0
C2	-- 70 cm	60	1,29	3,6	0,28	46	6	0,1	2,0	5,0
C3	--100 cm	85	1,25	3,2	0,27	40	4	0,0	1,5	2,0
C4	-- 130 cm	115	1,47	2,9	0,12	35	6	0,0	0,1	0,1
C5	-- 200 cm	150	1,41	3,3	0,31	48	12	0,1	0,1	0,1

Composition granulométrique (%)								Caractères chimiques		
Arg	LF	LG	SFF	SF	SM	SG	SGG	Corg %	MO%	Calc t%
18,7	20,3	25,7	20,5	8,6	5,4	0,6	0,2	12,10	2,08	5,30
17,8	19,8	26,5	19,6	10,8	4,8	0,4	0,3	7,90	1,36	5,60
17,2	21,0	24,9	26,6	4,5	5,6	0,2	0,0	4,80	0,83	7,20
15,7	18,6	20,5	18,3	17,2	9,1	0,5	0,1	3,40	0,58	7,30
8,0	6,4	5,4	18,4	6,0	53,1	2,6	0,1	1,80	0,31	3,10
10,4	9,5	11,4	21,6	38,6	8,2	0,2	0,1	2,40	0,41	4,60

Verdun/Garonne ; sol alluvial ; peupliers I214 14 ans

Etat d'humidité le 12/05/2003 : frais à assez sec de 0 à 190 cm ; humide à partir de 190 cm.

Limites des horizons			Caractères physiques					Enracinement		
Horizons	Prof. (cm)	Centre	da	Rm (Mpa)	E(Rm)	Rcs (kPa)	E(Rcs)	Rac G	Rac M	Rac F
Ap	--20 cm	10	1,1	3,28	0,62	53	12	<0,5	2,0	2,0
C1	--50 cm	40	1,32	3,92	0,51	55	6	0,0	0,1	0,1
C2	--105 cm	75	1,34	2,94	0,27	38	3	0,0	0,1	0,1
C3	--120 cm	110	--	1,6	0	69	3	0,0	0,1	0,1
C4	--190 cm	155	1,29	1,56	0,32	43	6	0,1	2,0	3,0
C5	--250 cm	220	--	1,38	0,2	18	4	0,0	2,0	4,5

Composition granulométrique (%)								Caractères chimiques		
Arg	LF	LG	SFF	SF	SM	SG	SGG	Corg %	MO%	Calc t%
22,5	25,2	23,7	21,5	5,8	0,9	0,2	0,2	22,9	3,94	7,8
16,9	18	18,1	22,8	22	1,9	0,2	0,1	8,8	1,51	7,2
19,9	27,6	23,5	25,6	2,3	0,8	0,2	0,1	9,8	1,69	12,3
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
14,2	17,6	32,2	32,6	2,7	0,4	0,2	0,1	5,4	0,93	10,4

- PARTIE VII -

**ANALYSE ARCHITECTURALE DES
SYSTEMES RACINAIRES**

VII.1 – Résultats de 2002

(Marie Maitrot, Christophe Drénou, IDF)

1. Méthode

Afin de mettre en évidence les différences qui peuvent exister entre les 2 cultivars étudiés, nous avons choisi de lister un certain nombre d'éléments qui sont : la longueur, les diamètres horizontaux et verticaux, l'inclinaison et l'azimut des racines de diamètre supérieur ou égal à 1 cm. Le relevé de ces paramètres a été effectué selon un cheminement précis et exhaustif (méthode MTG – AMAP, Godin *et al* , 1998).

Une architecture racinaire est une arborescence orientée, ou chaque segment possède un antécédent unique. Chaque segment de racine est compris entre deux points successifs de ramification. Le parcours de l'architecture débute à la base du tronc (ordre 1), et à chaque ramification rencontrée, le chemin suit l'ordre de ramification le plus élevé. Lorsqu'une extrémité est atteinte, la description reprend au point antécédent de la racine. En appliquant ces règles, la totalité des éléments de l'architecture est parcourue. Le chemin s'achève lorsque l'extrémité de l'ordre 1 est atteinte (fig. 1).

Un logiciel de saisie appelé ARCHIROOT a été développé afin d'assister ces mesures longues et fastidieuses. Celui-ci permet d'écrire et de stocker les données directement sous format MTG lu par les logiciels AMAP. Ce logiciel permet aussi de visualiser instantanément une représentation virtuelle du système racinaire, afin de pouvoir déceler les erreurs de saisie sur place, lorsqu'elles peuvent encore être corrigées (fig. 2).

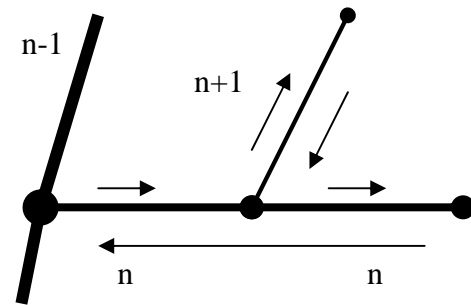


Figure 1 : description d'une arborescence du type architecture racinaire

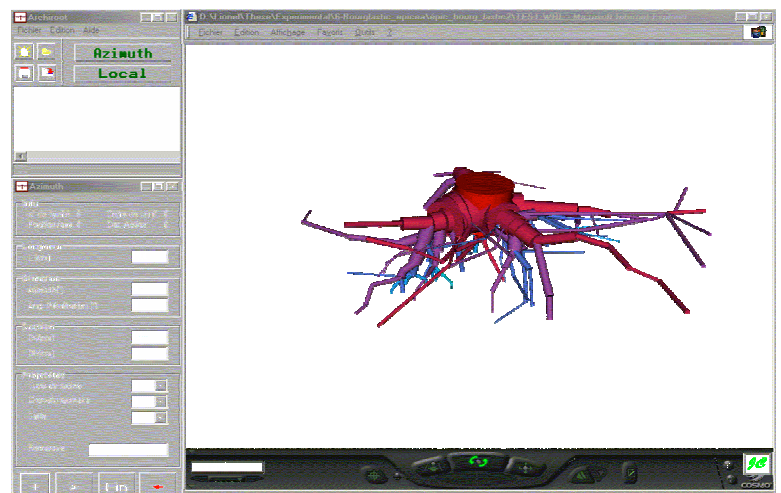


Figure 2 : logiciel Archiroot, outil d'aide à la description de l'architecture racinaire sur le terrain

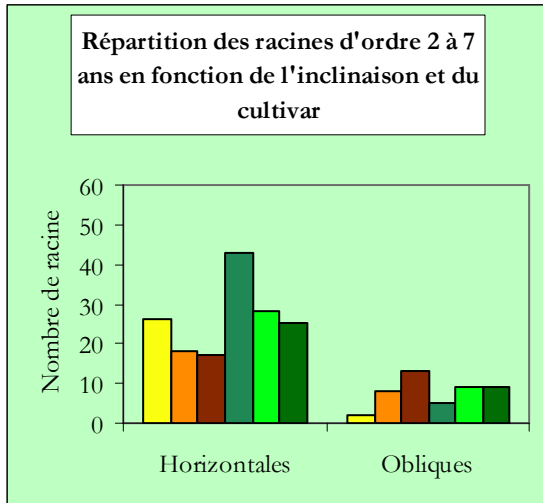
Afin de comprendre les différents tableaux et graphiques suivants, il est nécessaire de définir nos critères de classification.

De nombreux travaux mentionnent trois catégories de racines : les horizontales, les obliques et les verticales. Ces trois types ont été définis selon leur inclinaison. Les racines ayant une inclinaison inférieure à 20° sont les horizontales. Entre 20° et 70° ont été définies les racines obliques. Quant aux verticales, elles ont une inclinaison supérieure ou égale à 70°.

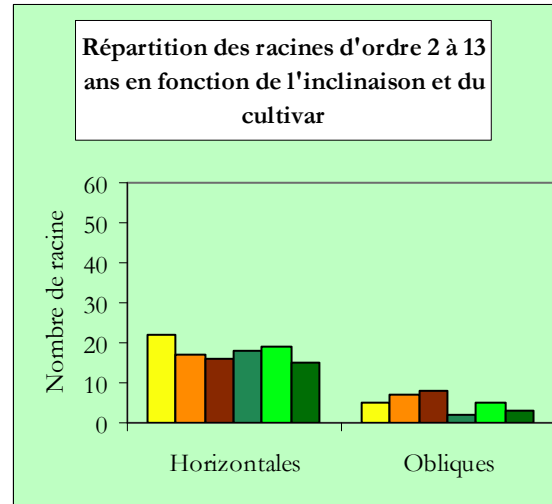
Le système de notation de la ramification est le suivant : la racine d'ordre 1 correspond au plançon de peuplier, les racines d'ordre 2 prennent naissance sur l'ordre 1, les racines d'ordre 3 sont portées par les ordres 2 et ainsi de suite.

Pour la représentation graphique, ils nous a semblé plus intéressant de reporter les valeurs de chaque individu, même si cela rend les graphiques plus compliqués, au lieu de faire des moyennes avec si peu d'effectif (3 arbres/âge/cultivar). Notre choix de représentation graphique s'est tourné vers les histogrammes. Les trois nuances de jaune correspondent aux trois individus Raspalje et les trois nuances de vert au trois Beaupré.

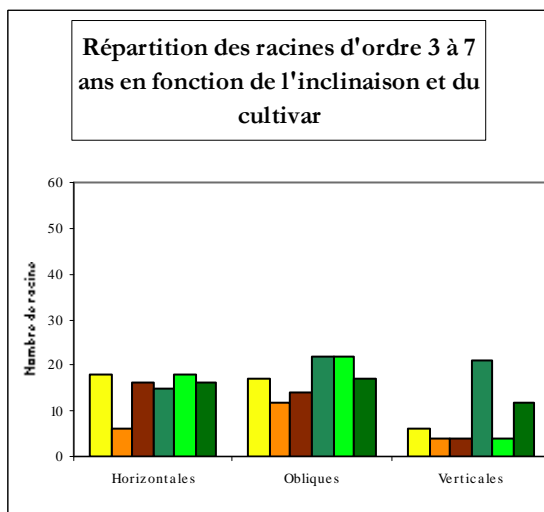
Planche n°1 : Répartition des racines selon l'ordre, l'âge et l'inclinaison



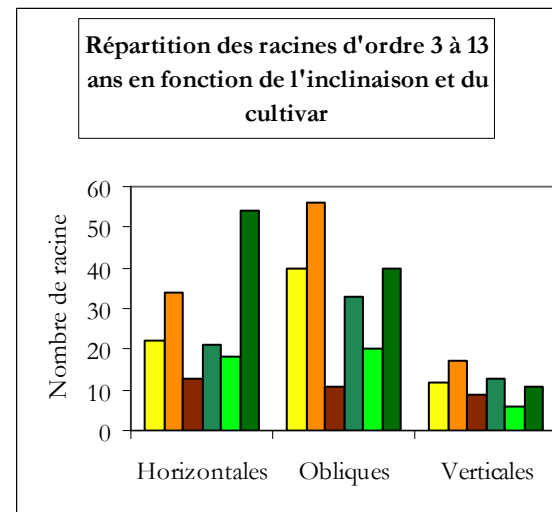
Graphique n°1



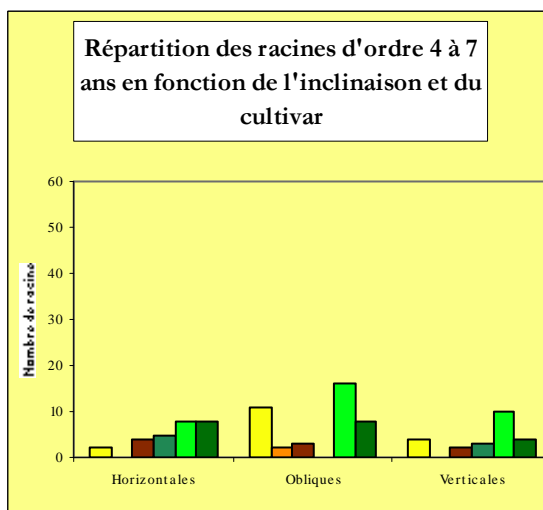
Graphique n°2



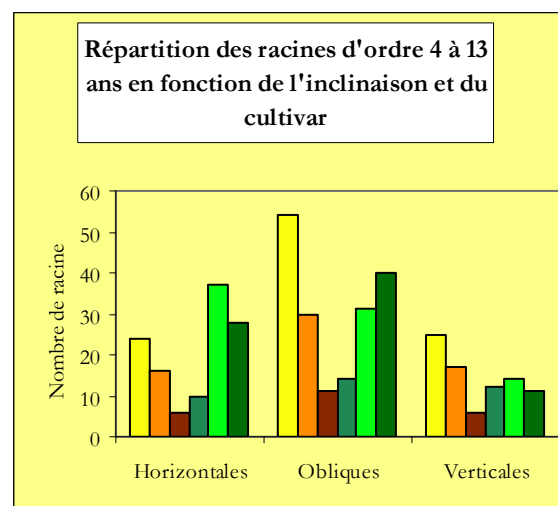
Graphique n°3



Graphique n°4



Graphique n°5



Graphique n°6

Légende commune à tous les graphiques



2. Répartition des racines selon l'ordre, l'âge et l'inclinaison

Cette première planche comporte six graphiques caractérisant les effectifs des racines en fonction de leur inclinaison (horizontales, verticales et obliques), de leur ordre de ramification (2,3 et 4) et de l'âge du cultivar (7 ou 13 ans). Afin de mieux interpréter ces graphiques, deux types de lecture sont possibles : la lecture horizontale suivant l'âge et la lecture verticale suivant l'ordre.

La lecture verticale tout d'abord, nous renseigne sur l'évolution des effectifs en fonction de la ramification et ce à un âge précis. A 7 ans pour les graphiques n°1, 3 et 5 et à 13 ans pour les n°2, 4 et 6. Les histogrammes montrent qu'à 7 ans, il y a une diminution du matériel avec les ordres et qu'à 13 ans, le matériel est essentiellement composé de racine d'ordre 3 et 4. Les effectifs des ordres 2 restent similaires à 7 et à 13 ans, seul le nombre d'horizontales chez Beupré diminue.

La lecture horizontale, ensuite, suit un code de couleur permettant les comparaisons plus aisées. Commençons sur les graphiques n°1 et n°2 qui correspondent à l'ordre 2, à 7 et 13 ans. On peut voir qu'à 7 ans le Beupré présente plus d'horizontales que le Raspalje (32 en moyenne sur le Beupré contre 20 en moyenne chez le Raspalje) mais moins d'obliques. A 13 ans, la différence notable sur les effectifs d'horizontales s'est estompée, mais le Raspalje conserve toujours plus d'obliques (7 en moyenne) que le Beupré (3 en moyenne).

Les graphiques suivants sur fond blanc s'intéressent aux racines d'ordre 3 (celles qui sont insérées sur les racines d'ordre 2) chez les deux cultivars, à 7 ans pour le n°3 et à 13 ans pour le n°4. On remarque tout d'abord une nouvelle catégorie de racines : les verticales. Rarement présentes en ordre 2, elles déterminent à cet ordre une caractéristique remarquable. En effet, sur le graphique n°3, elles sont pratiquement trois fois plus représentées chez le Beupré que chez le Raspalje. Même si l'individu n°6 semble échappé à la règle, il n'en est rien si l'on regroupe ordre 3 et 4 (voir graphique n°5). A 13 ans, comme pour l'ordre 2, les différences entre cultivars s'égalisent. Par exemple, le nombre moyen de verticales chez Raspalje et de 12, contre 10 chez Beupré.

Les graphiques n°5 et n°6 sur fond jaune, nous permettent de dire qu'à 7 ans, les deux cultivars n'ont que très peu de matériel tandis qu'à 13 ans, les effectifs de racines d'ordre 4 ont approximativement sextuplé chez Raspalje comme chez Beupré. En revanche, il n'y a aucune différence significative d'effectif entre les catégories d'inclinaison pour les deux cultivars.

◆ En résumé ◆

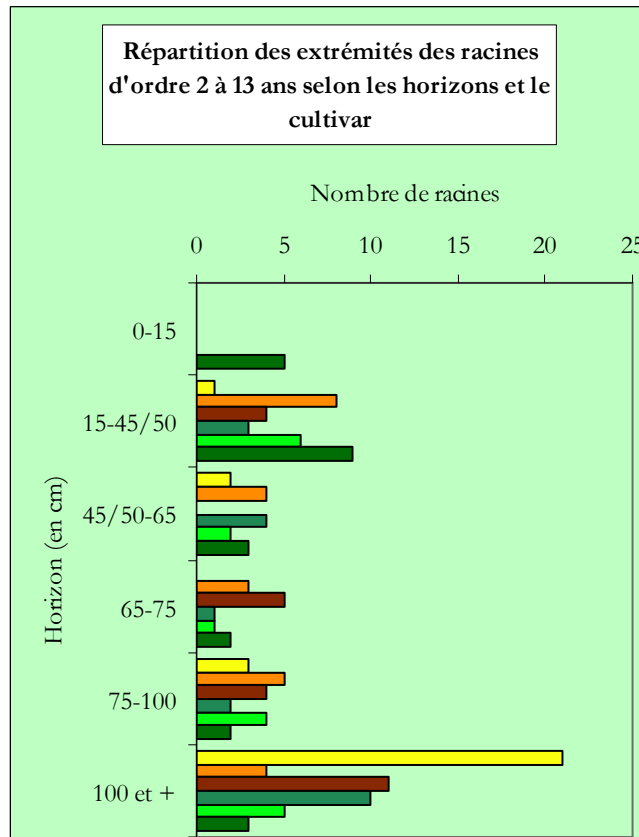
Lecture verticale :

- ✓ A 7 ans : diminution de la quantité de matériel avec les ordres
- ✓ A 13 ans : peu de racines d'ordre 2 mais beaucoup en ordre 3 et 4.

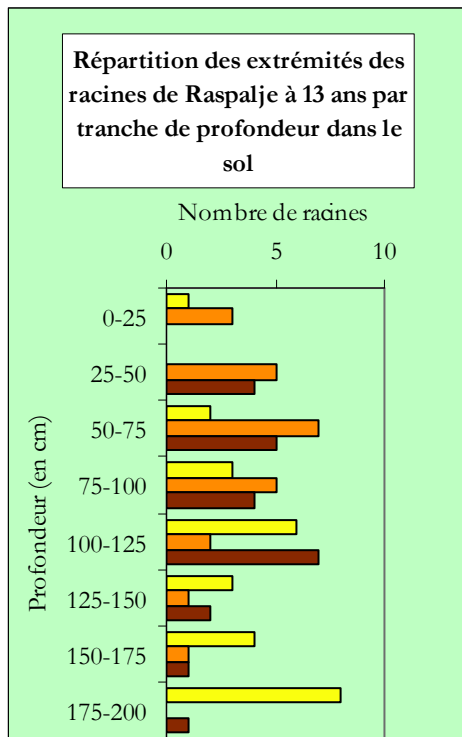
Lecture horizontale :

- ✓ En ordre 2 : plus de racines horizontales chez le Beupré à 7 ans, aucune différences notoires à 13 ans.
- ✓ En ordre 3 : à 7 ans, l'effectif de verticale chez Beupré est le triple de celui de Raspalje, à 13 ans cette particularité n'est plus aussi visible.
- ✓ En ordre 4 : très peu de racines à 7 ans, à 13 ans le nombre de racine est six fois plus grand qu'à 7 ans.

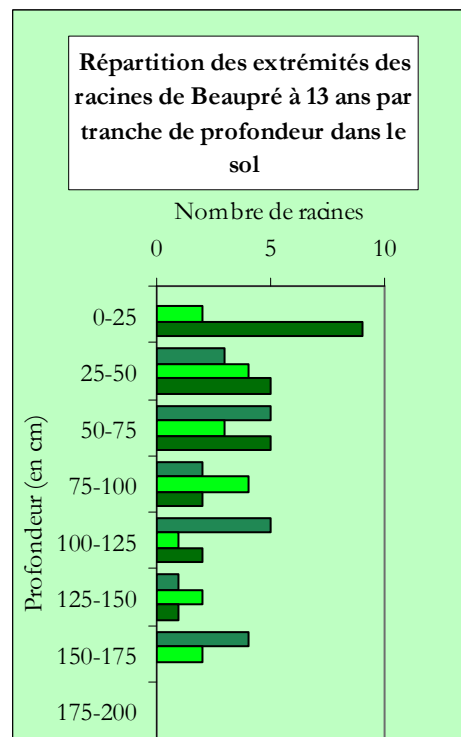
Planche n°2 : Répartition des racines d'ordre 2 à 13 ans



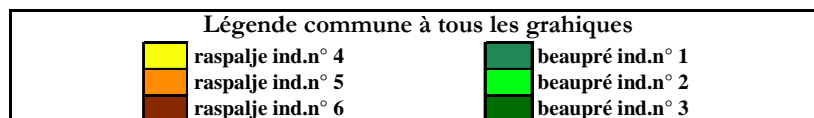
Graphique n°1



Graphique n°2



Graphique n°3



3. Répartition des racines d'ordre 2

Cette planche caractérise la répartition des extrémités des racines d'ordre 2 suivant les horizons (graphique n°1) et la profondeur (graphique n°2 et 3) à 13 ans.

Intéressons nous d'abord au premier graphique. On peut voir trois zones : la première correspondant à l'horizon 0-15 où seul un individu sur six présente des racines dans les 15 premiers centimètres. La seconde, de 15 à 45/50 où le nombre de racine augmente puis de 45/50 à 75-100 où le nombre semble diminuer graduellement. Cependant, on peut aussi observer un « creux » entre 65 et 75 cm (les racines de Raspalje et Beaupré semblent fuir cet horizon) et une importante quantité de matériel à l'horizon 100 et +.

L'accumulation visibles dans l'horizon inférieur nous a amené à créer les deux graphiques suivants. Ils présentent la répartition à 13 ans des extrémités des racines suivant des tranches de profondeur de 25 cm chez le Raspalje à gauche et chez le Beaupré à droite. D'une part, la répartition en trois zones suit le même schéma que le graphique n°1. Seul la présence du creux est beaucoup moins marquée. D'autre part, si l'on trace une courbe suivant le nombre, on s'aperçoit que le pic de densité maximum est plus près de la surface chez le Beaupré que chez le Raspalje. De plus, il n'y a que peu de racine en dessous de 175 cm chez le Beaupré. L'enracinement semble donc être plus profond chez le Raspalje que chez le Beaupré.

A 7 ans, comme nous le montrent les trois graphiques de l'annexe D, la répartition des racines d'ordre 2 ressemble à la distribution à 13 ans. Seule la profondeur maximum d'exploration est supérieure (200 cm et + à 7 ans contre 175-200 cm à 13 ans).

◇ En résumé ◇

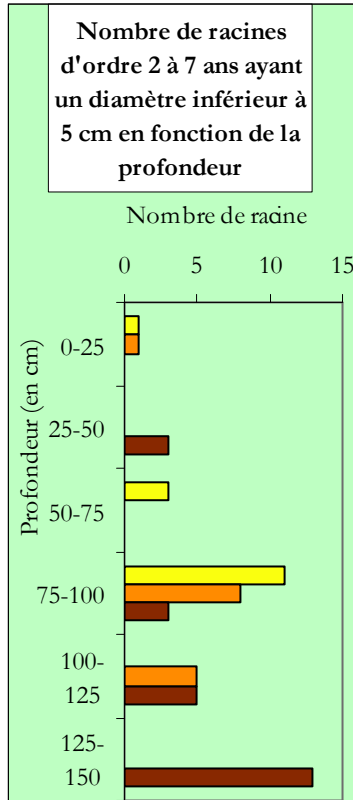
Horizons :

- ✓ 0 à 15 cm : peu à pas de matériel
- ✓ 15 à 45/50 cm : augmentation de l'effectif
- ✓ 45/50 à 75/100 cm : diminution graduelle du nombre de racines
- ✓ 65-75 : présence d'un creux.

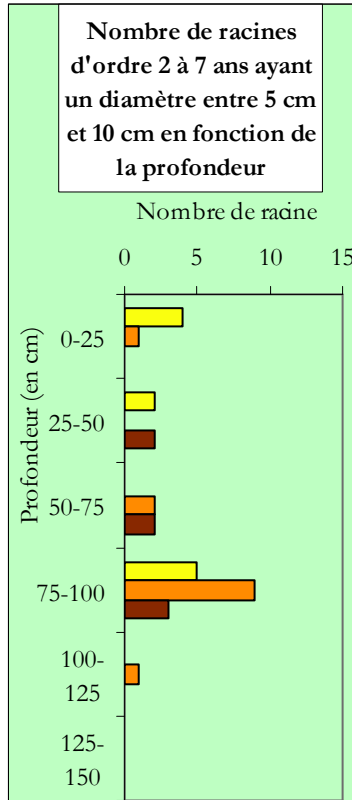
Profondeur :

- ✓ Raspalje : plus de racines en profondeur
- ✓ Beaupré : majorité de racines en surface

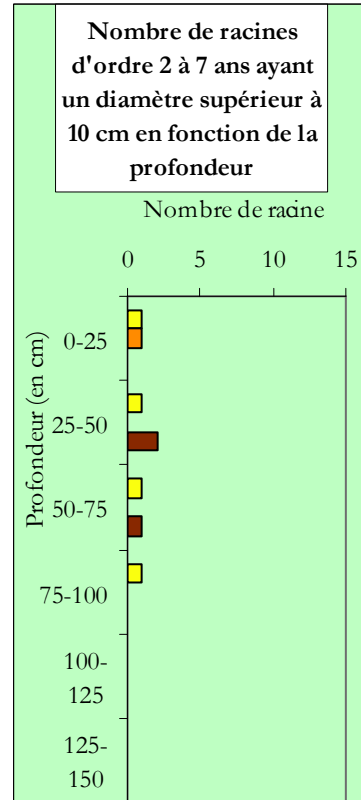
Planche n°3 : Le diamètre des racines d'ordre 2 à 7 ans



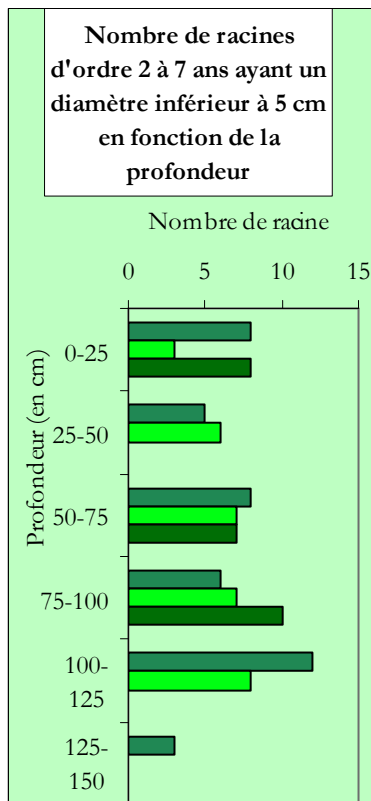
Graphique n°1



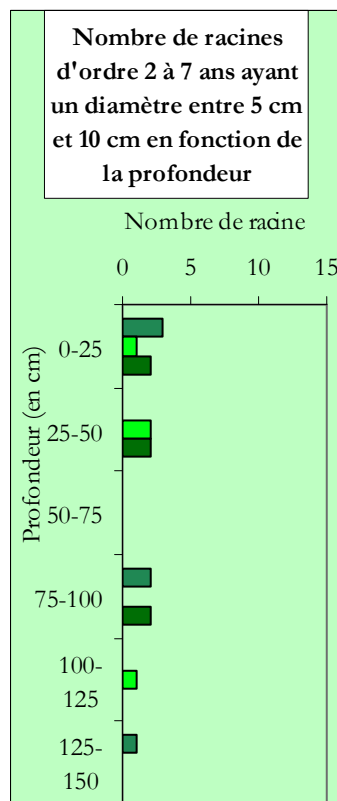
Graphique n°2



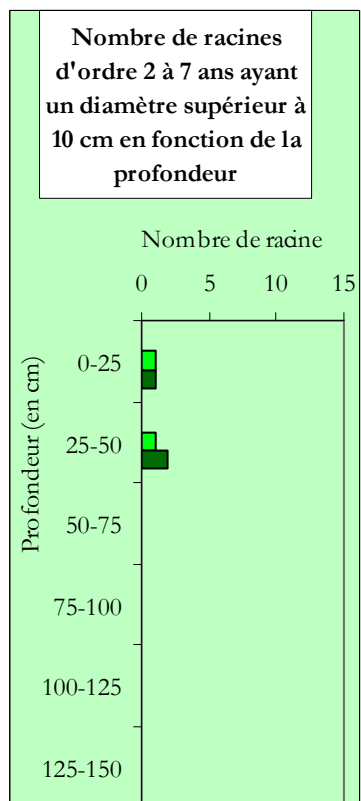
Graphique n°3



Graphique n°4



Graphique n°5



Graphique n°6

Légende commune à tous les graphiques			
	raspalje ind.n° 2		beaupré ind.n° 5
	raspalje ind.n° 3		beaupré ind.n° 6
	raspalje ind.n° 4		beaupré ind.n° 7

4. Le diamètre des racines d'ordre 2

La planche n° 3 décrit, pour chaque cultivar, le nombre et le diamètre de racines d'ordre 2 selon leur répartition en profondeur.

Les trois premiers graphiques horizontaux, n°1, 2 et 3 caractérise le Raspalje. Ainsi, les racines de diamètre inférieur à 5 cm, se trouvent plutôt en profondeur (45 en dessous de 75 cm contre 8 au dessus.). Les racines de diamètre moyen (5 à 10 cm) sont majoritairement représentées à la profondeur 75-100. Les grosses en revanche, sont peu nombreuses, entre 0 et 3, mais sont réparties le long du plançon jusqu'à 100 cm en dessous de la surface du sol.

Les graphiques n°4, 5 et 6, nous montrent la répartition chez le Beaupré. Ce cultivar présente tout d'abord une grande quantité de petites racines bien réparties tout le long du plançon. Les racines de diamètre compris entre 5 et 10 cm, sont peu représentées et aucune racine n'explore le sol entre 50 et 75 cm. Le graphique n°6, nous permet de voir que les grosses racines de Beaupré restent en surface, ne descendant pas en dessous de 50 cm.

Une comparaison verticale, entre les graphiques n°1 et 4, n°2 et 5 et n°3 et 6 confirme que le Beaupré présente plus de petites racines que le Raspalje (33 en moyenne contre 18). Cependant, le Raspalje compte en proportion plus de racine en profondeur. Les graphiques à droite, souligne ce phénomène. Chez Beaupré, un individu (n°5) ne présente pas de grosses racines tandis que les trois individus Raspalje en ont tous. De plus chez Beaupré, il n'y a aucune racine de diamètre supérieur à 10 cm en dessous de 50 cm. Alors que les racines de Raspalje explorent jusqu'à 100 cm de profondeur.

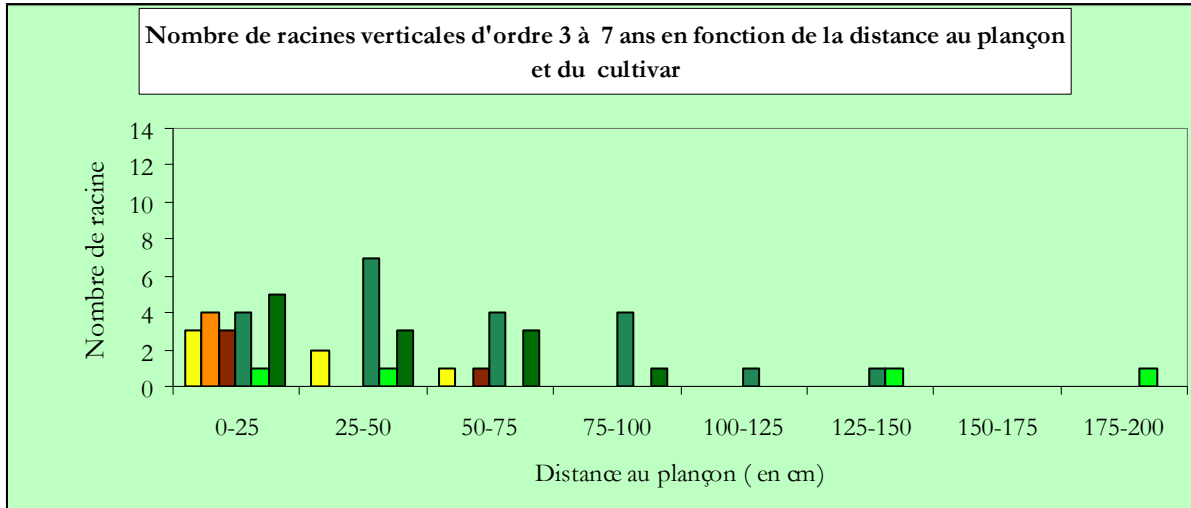
A 13 ans, les petites racines ont un diamètre inférieur à 10 cm, les racines moyennes entre 10 et 20 cm et les grosses racines ont un diamètre supérieur à 20 cm. Raspalje conserve un enracinement plus en profondeur mais Beaupré compte désormais un nombre de racines sensiblement identique à celui de Raspalje (annexe E).

◆ En résumé ◆

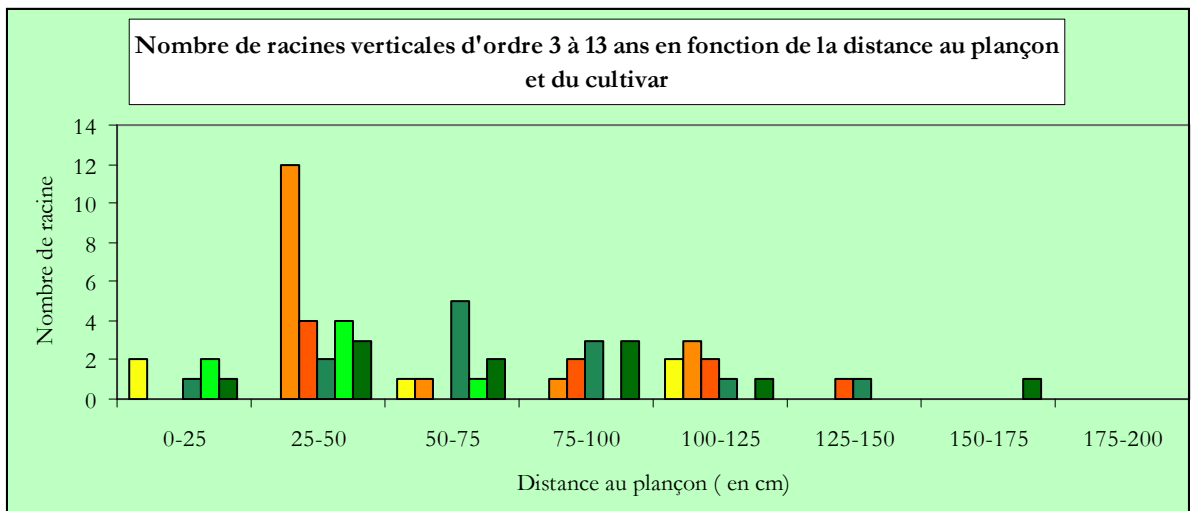
Diamètres :

- ✓ Petites racines : en profondeur chez le Raspalje, plus nombreuses chez le Beaupré
- ✓ Racines moyennes : entre 75 et 100 cm de profondeur chez le Raspalje, peu nombreuses mais réparti le long du plançon chez le Beaupré
- ✓ Grosses racines : réparties également sur le plançon jusqu'à 100 cm chez le Raspalje, seules quelques unes chez le Beaupré regroupées près de la surface.

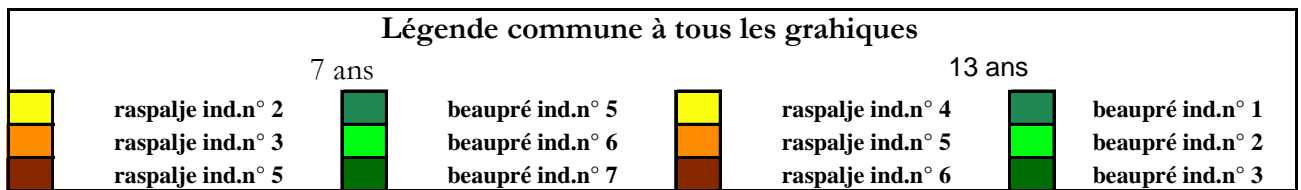
Planche n°4 : Les racines verticales d'ordre 3



Graphique n°1



Graphique n°2



5. Les racines verticales d'ordre 3

Cette dernière planche regroupe deux graphiques qui précisent le nombre et la position des verticales d'ordre 3, pour les six individus de 7 ans et les six individus de 13 ans. Ces racines sont plus nombreuses et réparties plus également sur un axe horizontal à 7 ans chez le Beaupré que chez le Raspalje. Par exemple, l'individu n° 6 chez Beaupré présente des verticales sur chaque intervalle tandis que le n° 2 chez Raspalje, présente, une racine à 50-75 et 2 dans les 25 premiers cm du plançon. Les verticales chez le Raspalje sont surtout concentrée dans un rayon de 50 cm autour du plançon tandis que chez le Beaupré, le cercle formé peut avoir un rayon jusqu'à 200 cm. A 13 ans, la différence d'effectif et de répartition s'estompe et toutes les racines verticales se trouvent entre 0 et 175 cm du plançon.

◇ En résumé ◇

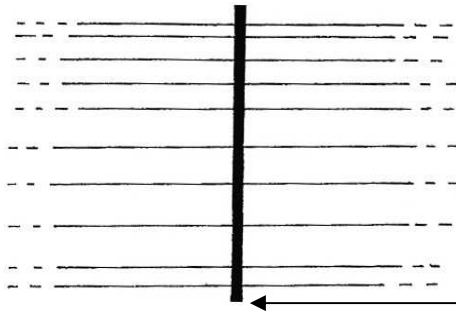
A 7 ans :

- ✓ Plus de verticales chez Beaupré
- ✓ Rayon de présence plus grand chez Beaupré

A 13 ans :

- ✓ Rayon identique de 175 cm pour les deux cultivars

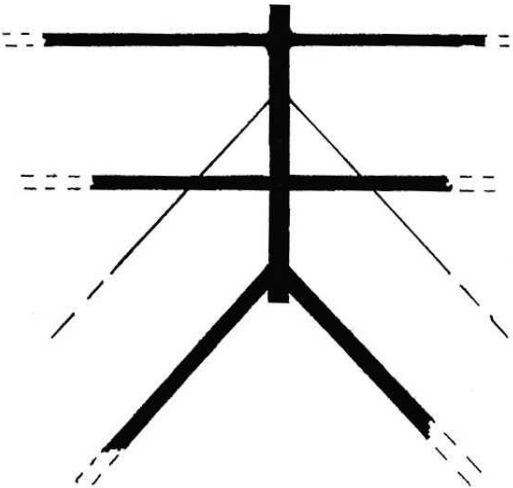
2 ans



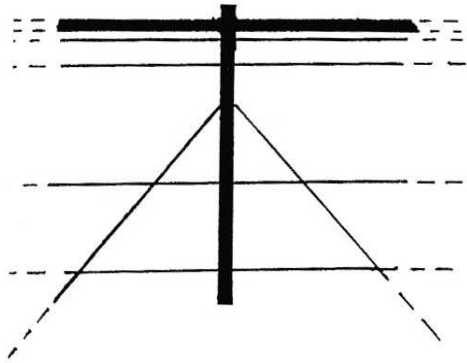
env. 100 cm

7 ans

Raspalje

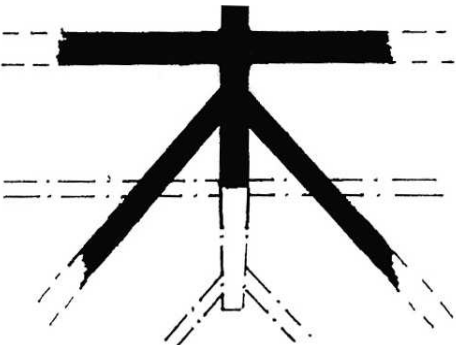


Beaupré

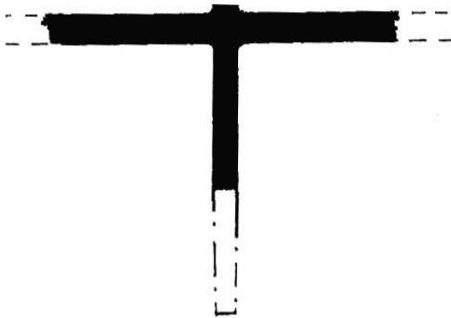


13 ans

Raspalje



Beaupré



6. Synthèse

Cette étude nous a permis de dégager, pour chaque âge, des caractéristiques inhérentes à chaque cultivar.

A 2 ans, l'architecture de Raspalje et du Beaupré est identique. Elle est constituée par un plançon sur lequel s'ancrent de longues racines horizontales d'ordre 2 non ramifiées.

A 7 ans, ces racines n'ont pas évolué de la même façon. Tous les systèmes racinaires présentent quatre ordres de ramification de racines ligneuses. Mais chez le Beaupré, on remarque plus de racines horizontales et les plus grosses sont en surface. Chez le Raspalje en revanche, il y a moins d'horizontales mais les plus grosses sont mieux réparties en profondeur. Le Beaupré présente aussi moins d'obliques que le Raspalje. En plus de leur nombre supérieur, les racines obliques de Raspalje sont plus grosses et certaines sont insérées à l'extrémité du plançon.

A 13 ans, les systèmes racinaires ont régressé en profondeur et tous les individus présentent de grosses racines horizontales d'ordre 2 avec beaucoup de petites racines en ordre 3 et 4. Cependant, le Beaupré a un nombre d'anastomoses supérieur à celui de Raspalje (au niveau des racines d'ordre 2). Raspalje possède plus de grosses obliques d'ordre 2.

Grâce à toutes ces informations, nous avons créé la planche ci-contre qui présente, à 2ans 7 ans et 13 ans, les portraits-robots de Raspalje à gauche et Beaupré à droite. Certaines conventions ont été prises afin de rendre les schémas plus compréhensibles et lisibles. Ainsi, nous avons choisi de ne représenter que les racines d'ordre 2 ayant un diamètre dominant (supérieur à 5 cm pour les individus de 7 ans et à 10 cm pour les individus de 13 ans). Le nombre de racines dessinées respecte la proportion entre 2, 7 et 13 ans et entre Raspalje et Beaupré. Cette représentation nous permet essentiellement de comparer les deux cultivars et de suivre leur évolution. C'est pourquoi aucune échelle de longueur et de diamètre n'est représentée.

Légende :

———— : racine, l'épaisseur du trait matérialise l'épaisseur de la racine :

-à 7 ans : trait fin : diamètre entre 5 et 10 cm

trait épais : diamètre supérieur à 10 cm

-à 13 ans :trait épais : diamètre supérieur à 20 cm

----- : continuité de la racine

- - - - : racine disparue, ou en voie de régression

➔ : évolution

VII.2 - Résultats de 2003

(Marion Duprat, Christophe Drénou, IDF)

En 2002, deux cultivars interaméricains (Beaupré et Raspalje) ont fait l'objet d'une description morphologique racinaire. Cette année, l'analyse de deux autres cultivars, cette fois-ci euraméricains (Dorskamp et I 214), a été réalisée. Les résultats obtenus nous permettent de comparer le développement racinaire des quatre cultivars.

1. Matériel et sites d'étude

Les caractéristiques des peupliers (cultivars, âge, nombre d'arbres...), et celles des sites (localisation, sols...), identiques pour tous les volets de ce programme, sont présentées au début de ce rapport.

2. Méthode

- Les plantations de peupliers sont réalisées à partir de plançons enfoncés dans le sol. Le plançon est appelé axe d'ordre 1, il donnera naissance à des racines d'ordre 2 qui porteront des racines d'ordre 3 et ainsi de suite.
- Après abattage des arbres et évacuation des troncs, les peupliers ont été déracinés à la pelle hydraulique sur chenille. Une tranchée en carré de 2 m de profondeur et de 4 m de côté est opérée autour des souches, puis celles-ci sont soulevées et déposées à l'envers sur le sol. Dans ces conditions, nous n'avons accès qu'à la partie centrale des appareils racinaires. Les racines sont ensuite mises à nu à l'air comprimé (utilisation d'un compresseur d'une puissance égale à 5000 l/min).
- Un dessin de l'architecture générale a été effectué pour chaque système racinaire.
- Parmi les nombreuses mesures réalisées, seules celles concernant le plançon (axe d'ordre 1) et les racines d'ordre 2 (A2) ont été exploitées. Les paramètres pris en compte sont :
 - le nombre de racines A2 au diamètre supérieur ou égal à 1 cm
 - la direction de croissance des A2 (utilisation de l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontale.
Si $0 < \alpha \leq 20^\circ$, racine horizontale. Si $20 < \alpha < 70$, racine oblique. Si $\alpha \geq 70$, racine verticale)
 - le niveau d'insertion des A2 sur le plançon, avec quatre tranches de profondeur (0-40 cm, 40-80, 80-120 et en-dessous de 120 cm)
 - les diamètres (dans un sens vertical, et dans un sens horizontal) des A2 au point d'insertion sur le plançon, avec quatre classes de diamètres (1 cm, de 1 à 5 cm, de 5 à 20 et supérieurs à 20 cm).

3. Cartographies des profils racinaires (figures 1 à 4)

Les figures 1, 2, 3 et 4 représentent pour chacun des quatre cultivars étudiés l'ensemble des racines d'ordre 2, individu par individu, selon leur ordre d'implantation sur les plançons. Voir la légende correspondante. Ces cartographies nous procurent un grand nombre d'informations (nombre de racines, répartition selon la profondeur, direction de croissance et changement de direction de croissance). Elles nous permettent de suivre la dynamique d'enracinement d'un

cultivar et de la comparer à celles d'autres cultivars. Malgré la forte hétérogénéité existante au sein d'un même cultivar et d'une même classe d'âges, plusieurs résultats apparaissent.

- Au niveau du nombre d'A2
 - Le cultivar Dorskamp se caractérise par un nombre très élevé d'A2 (une moyenne de 34 à 4 ans, 47 à 8 ans et 45 à 16 ans ; soit environ 10 racines de plus que les autres cultivars)
 - A 13 ans, Beaupré et Raspalje ont très peu d'A2 (une moyenne de 14 à 18) essentiellement localisés en surface. Ce fait traduit une forte contrainte à l'enracinement par anoxie due à une nappe phréatique peu profonde (1 à 2 m) et à des engorgements hivernaux fréquents.

- Au niveau de l'exploration du sol en profondeur
 - Plus le plançon est enfoncé profondément dans le sol au moment de la plantation, plus il y a de racines profondes.
 - Les racines A2 prenant naissance en-dessous de 120 cm sont surtout nombreuses chez Dorskamp.

- Au niveau des directions de croissance
 - A l'âge de 2 ans, tous les A2 sont horizontaux quel que soit le cultivar, et peuvent atteindre 3 mètres de longueur (cartographie non représentée).
 - A 4 ans, on retrouve une majorité d'A2 horizontaux chez I 214, mais les Dorskamp commencent à produire des racines obliques (A2 et A 3).
 - Entre 7 et 9 ans, seul I 214 conserve une majorité d'A2 horizontaux (62,85 %). Chez Beaupré, de nombreuses racines initialement horizontales deviennent verticales (en réalité, il s'agit le plus souvent d'un A3 vertical prolongeant un A2 horizontal dont l'extrémité est nécrosée). Chez Raspalje et Dorskamp, beaucoup d'A2 horizontaux deviennent obliques. De plus, chez Dorskamp, de nouveaux A2, entièrement obliques, apparaissent.
 - Entre 13 et 16 ans, les phénomènes précédents s'accroissent et le % de racines entièrement horizontales n'est plus que de 48,5 % pour I 214, de 30,21 % pour Beaupré, de 45,44 % pour Raspalje et seulement de 12,41 % pour Dorskamp. On notera que chez ce dernier, de nombreuses racines obliques finissent par devenir verticales.

4. Analyse des diamètres (tableaux 1 et 2)

- En règle générale, les diamètres grossissent avec l'âge, et les racines les plus grosses se situent pour la plupart en surface. Nous avons comparé deux à deux Beaupré et Raspalje d'une part (étudiés sur le site "Bariteau" en 2002) et I 214 et Dorskamp d'autre part (vus sur le site "St Pierre" en 2003). L'analyse des moyennes a été réalisée avec le test statistique d'Aspin-Welch en prenant un risque de première espèce de 5 %.

- Il en ressort que le cultivar Raspalje possède davantage de grosses racines que le cultivar Beaupré, et ceci aussi bien à 7 ans qu'à 13 ans (tableau 1). Sur le deuxième site d'étude (tableau 2), Dorskamp présente le plus grand nombre de grosses racines. A noter que le diamètre de la plus grosse racine chez les arbres adultes, varie selon les cultivars. Il prend

une valeur moyenne de 30 à 35 cm chez Beaupré et Raspalje, peut atteindre 41 cm chez Dorskamp, et n'est que de 24 cm chez les I 214.

- Les différences constatées pour les diamètres des racines sont en accord avec l'évolution de la circonférence des troncs à 1,30 m. Le tronc des Raspalje grossit plus vite que celui des Beaupré. De même, celui des Dorskamp évolue plus vite que celui des I 214 (Paillassa, comm. perso).

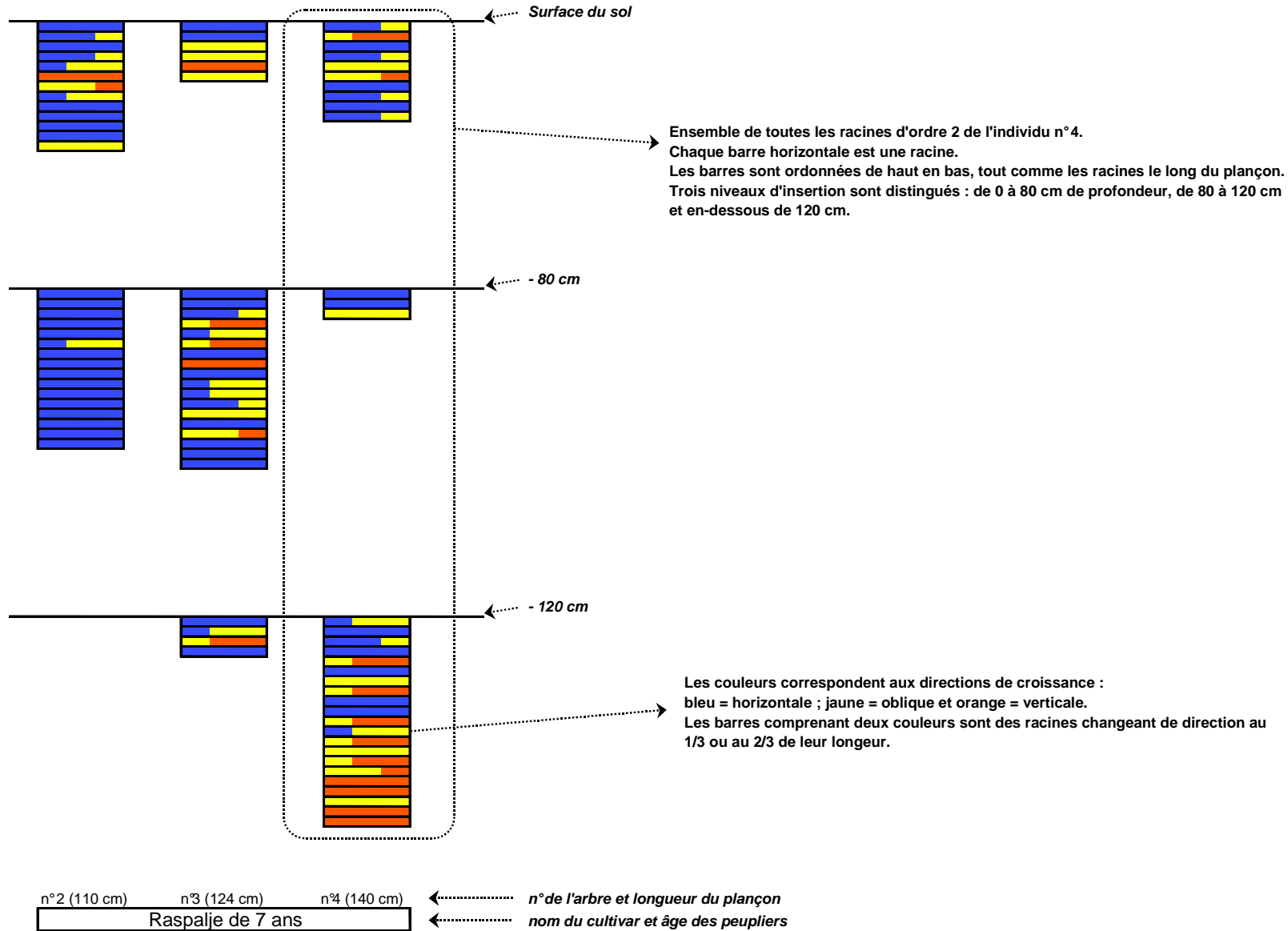
5. Résumé du développement racinaire des 4 cultivars (figure n° 5)

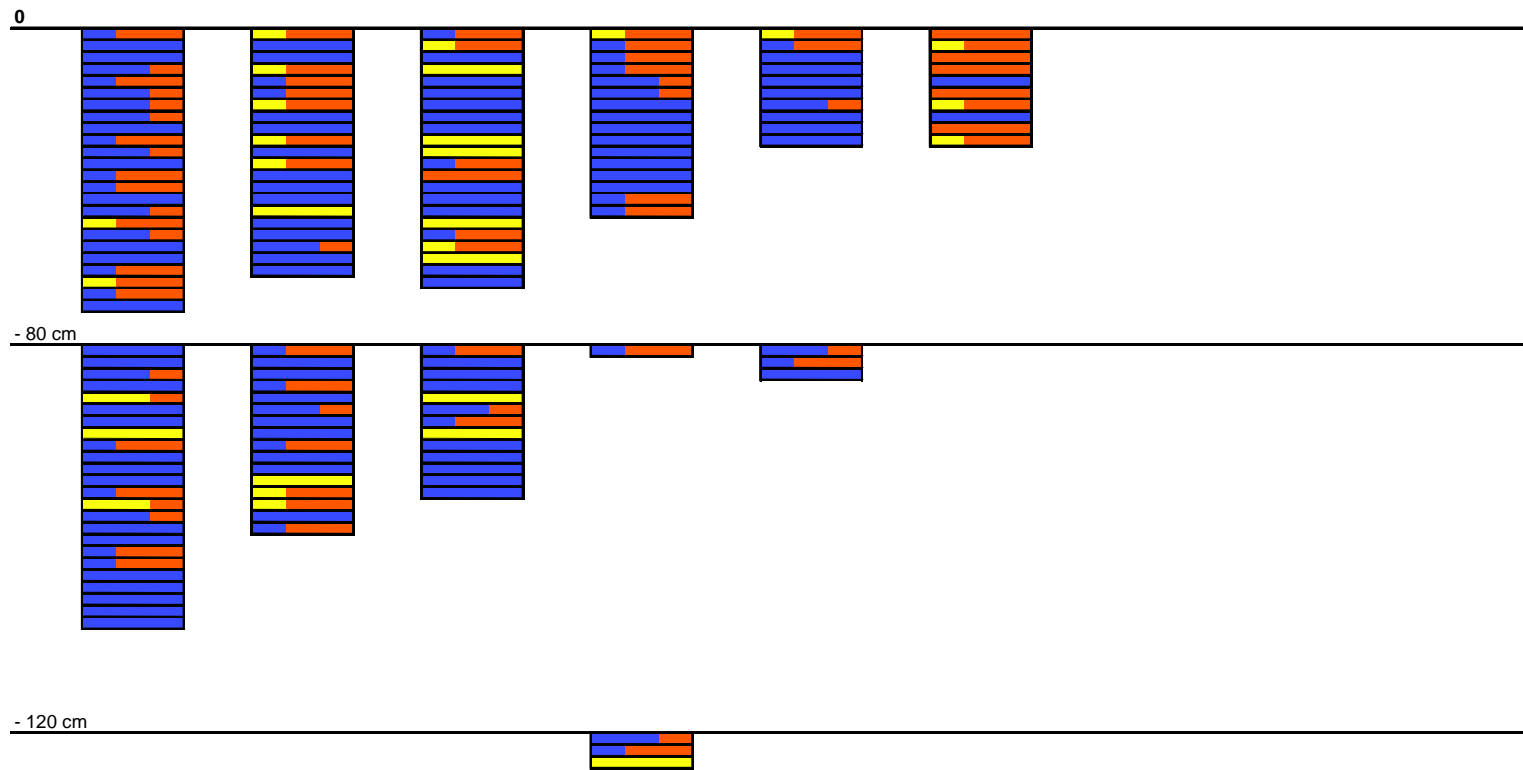
Malgré le faible nombre d'individus étudiés pour chaque cultivar (9) et les différences pédologiques entre les deux sites, une dynamique d'enracinement commune apparaît, avec des variations selon les cultivars. Ainsi, après la plantation, le plançon produit de longues racines horizontales jusqu'à 60 cm de profondeur environ, de nombreuses courtes racines en-dessous, et se termine par un bouquet de racines obliques et verticales. A partir d'environ 4 ans jusqu'à 8 ans, de nouvelles racines apparaissent sur le plançon (nouveaux A2) et sur les racines existantes (apparition d'A3 sur les A2). Cette étape est capitale car c'est à ce moment que l'architecture racinaire complète se met en place. Passé 9 ans, les racines grossissent fortement, privilégiant certaines directions de croissance variables selon les cultivars. Ainsi, les Dorskamp privilégient la direction oblique, les I 214 et les Beaupré préfèrent l'horizontale, seul Raspalje maintient deux directions (oblique et horizontale). Ces différences résultent directement de l'orientation des racines apparaissant à l'étape précédente, entre 4 et 8 ans. Beaupré et I 214 produisent essentiellement des A3 verticaux sous les A2 horizontaux, tandis que Raspalje et Dorskamp émettent des racines obliques (A2 ou A3).

L'ensemble de ces résultats se retrouve résumé sous forme de portraits robots (figure 5). Ceux-ci ont été réalisés en prenant le quart des effectifs des différentes racines tout en respectant leur répartition en trois classes de profondeur. Ont également été reproduites les proportions de trois classes de diamètre (0 à 5 cm : traits fins, 5 à 20 cm : traits moyens et > 20 cm : gros traits).

Les dessins réalisés sur le terrain et représentés à la même échelle sur les planches 1, 2 et 3, illustrent de façon plus réaliste les conclusions de notre travail.

Légende des figures n°1, 2, 3 et 4





n ⁵ (132 cm)	n ⁶ (122 cm)	n ⁷ (100 cm)	n ¹ (143 cm)	n ² (81 cm)	n ³ (33 cm)
Beaupré de 7 ans			Beaupré de 13 ans		

Figure n°1

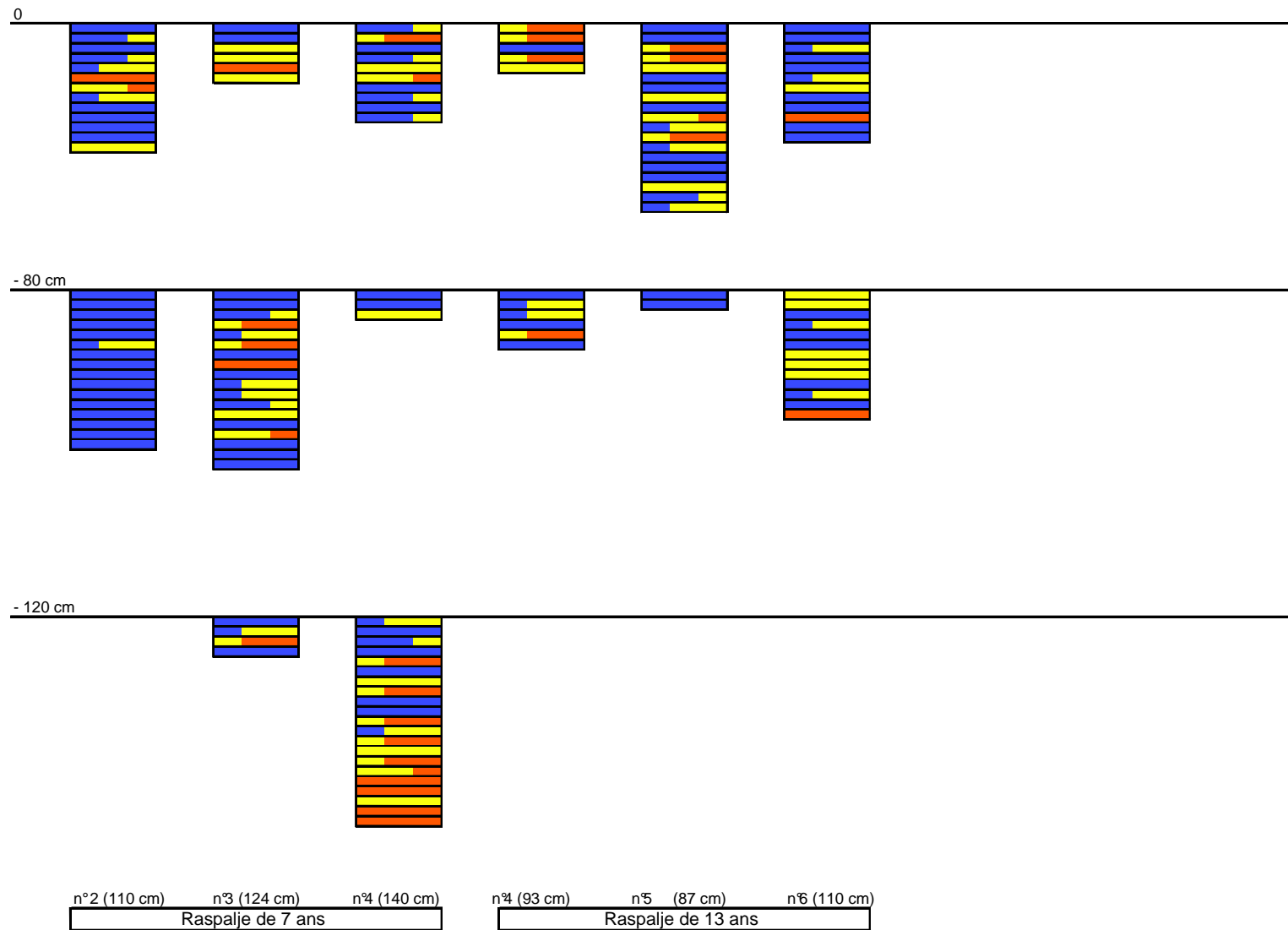


Figure n°2

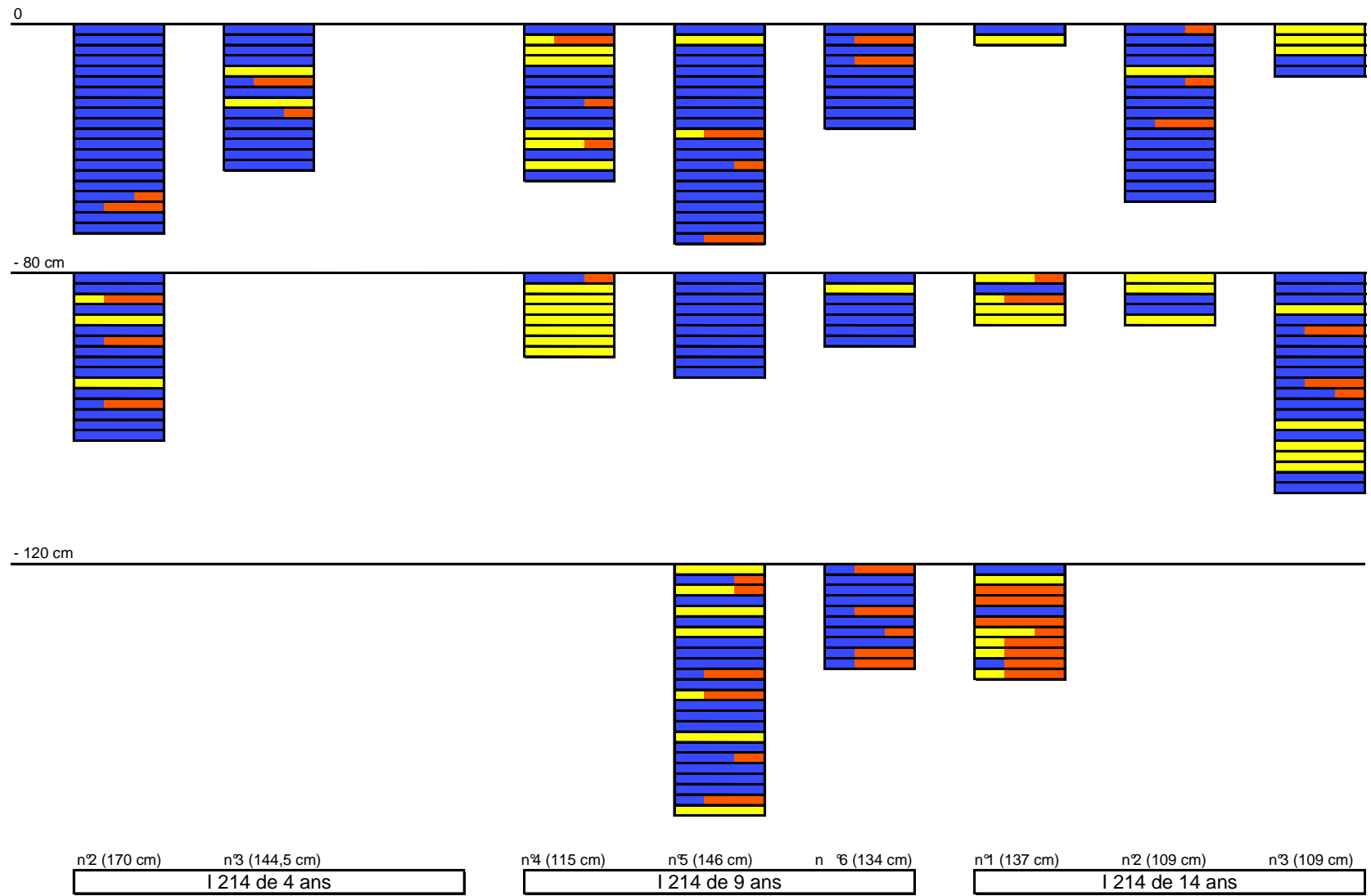


Figure n°3

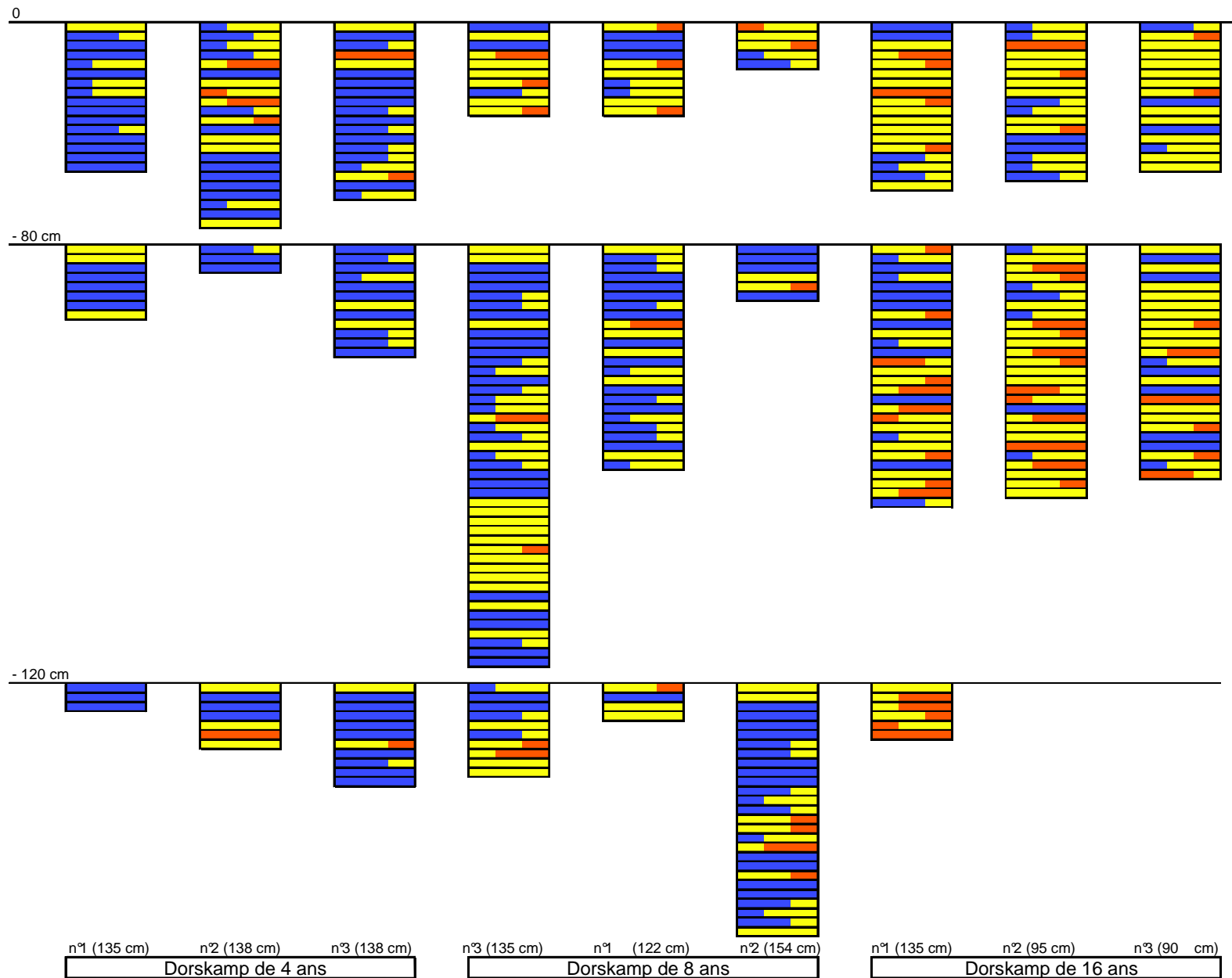


Figure n°4

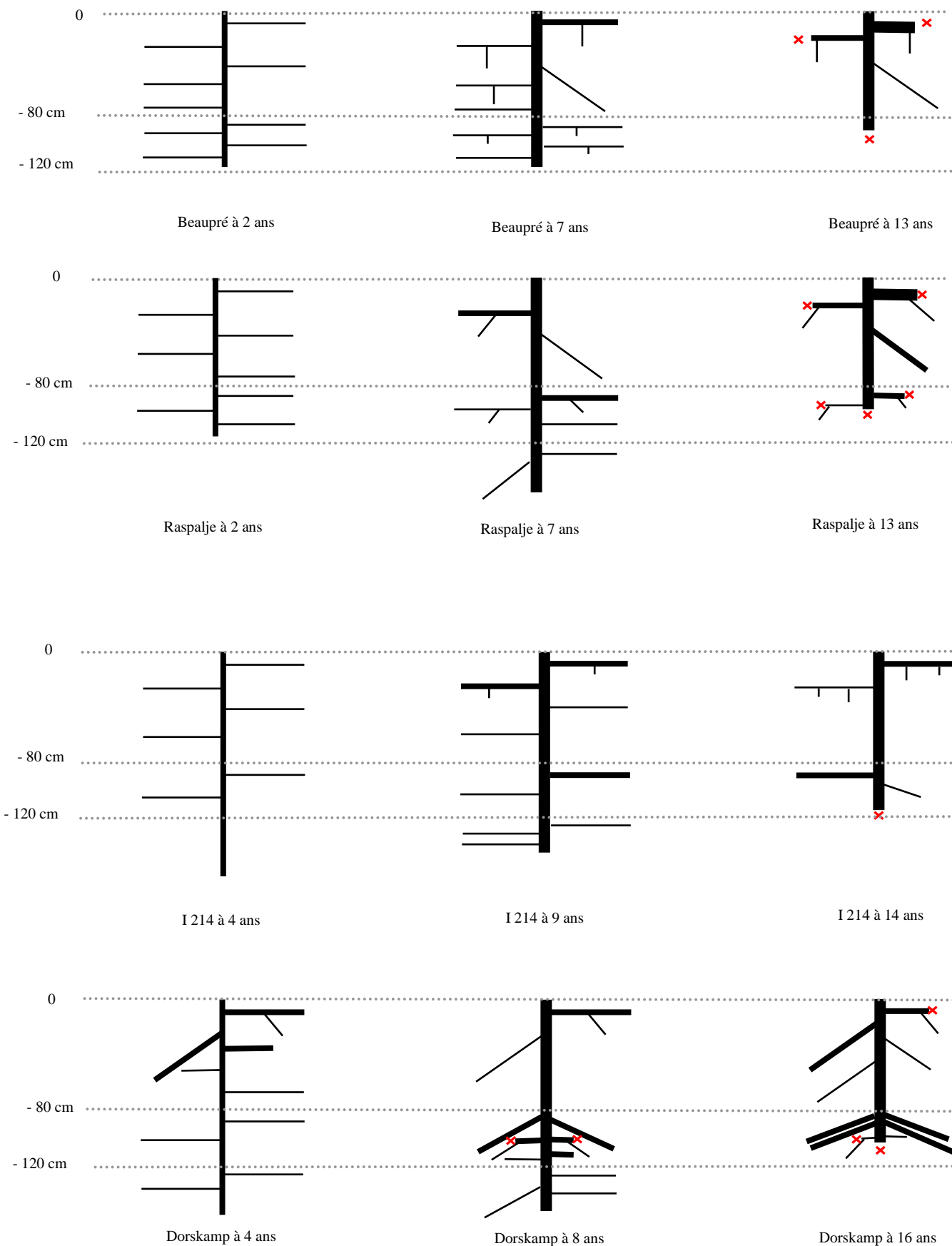
Tableau 1

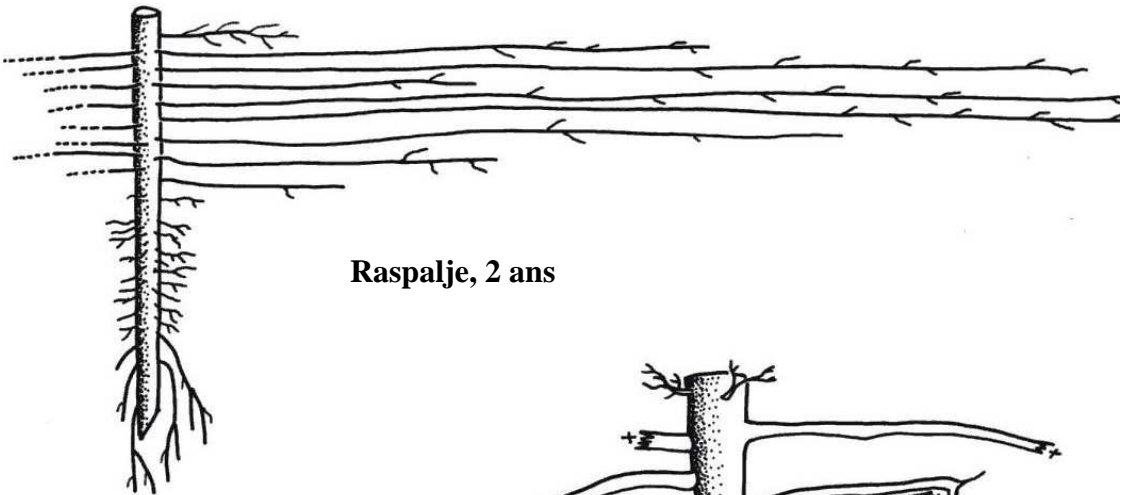
Comparaison des diamètres entre Beaupré et Raspalje (Dv = diamètre vertical, Dh = diamètre horizontal)				
	Cultivars	Moyenne	Ecart type	Différence significative (test d'Aspin-Welch à 5 %)
A 7 ans, nombre d'A2 ayant un 5 < Dv < 20 cm	Beaupré	7,33	1,88	Non
	Raspalje	12,33	3,09	
A 7 ans, nombre d'A2 ayant un 5 < Dh < 20 cm	Beaupré	7,00	0,81	Oui
	Raspalje	11,66	2,05	
A 13 ans, nombre d'A2 ayant un 5 < Dv < 20 cm	Beaupré	6,00	2,94	Non
	Raspalje	6,00	2,16	
A 13 ans, nombre d'A2 ayant un Dv ≥ 20 cm	Beaupré	3,00	0,81	Oui
	Raspalje	5,33	1,24	
A 13 ans, valeur du Dv maximal (cm)	Beaupré	30,66	1,88	Non
	Raspalje	35,00	4,08	

Tableau 2

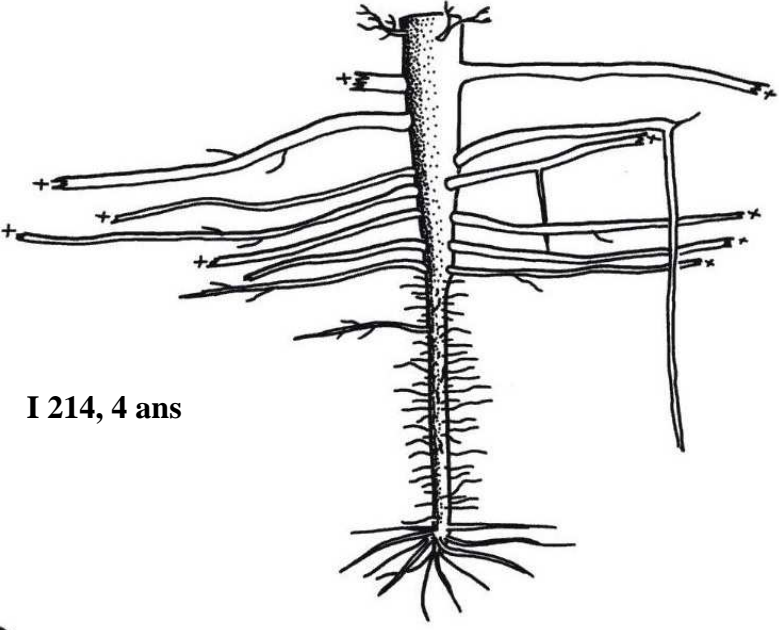
Comparaison des diamètres entre Dorskamp et I 214 (Dv = diamètre vertical, Dh = diamètre horizontal)				
	Cultivars	Moyenne	Ecart type	Différence significative (test d'Aspin-Welch à 5 %)
A 4 ans, nombre d'A2 ayant un 5 < Dv < 20 cm	I 214	1,50	0,50	Oui
	Dorskamp	7,00	1,41	
A 8/9 ans, nombre d'A2 ayant un 5 < Dv < 20 cm	I 214	11,66	2,62	Non
	Dorskamp	10,67	3,68	
A 14/16 ans, nombre d'A2 ayant un 5 < Dv < 20 cm	I 214	9,00	2,45	Oui
	Dorskamp	17,33	3,10	
A 14/16 ans, nombre d'A2 ayant un Dv ≥ 20 cm	I 214	2,00	0,82	Oui
	Dorskamp	3,67	0,47	
A 14/16 ans, valeur du Dv maximal (cm)	I 214		3,77	Oui
	Dorskamp	41,68	9,03	

Figure n°5 : Résumé de l'enracinement des 4 cultivars

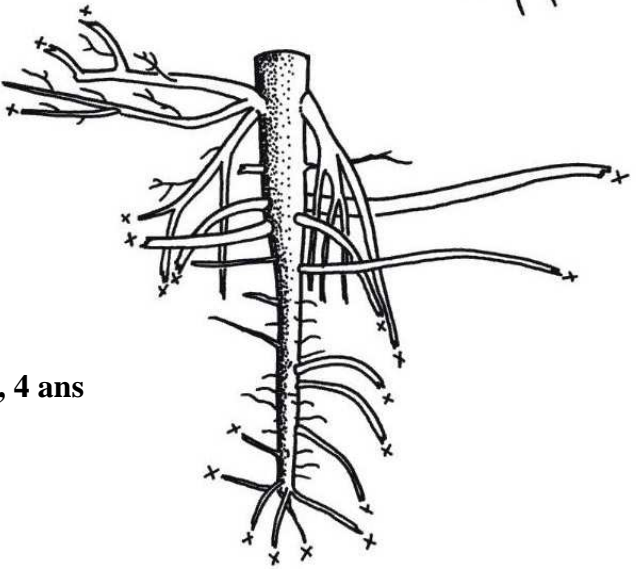




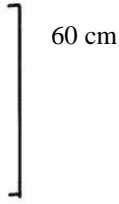
Raspalje, 2 ans

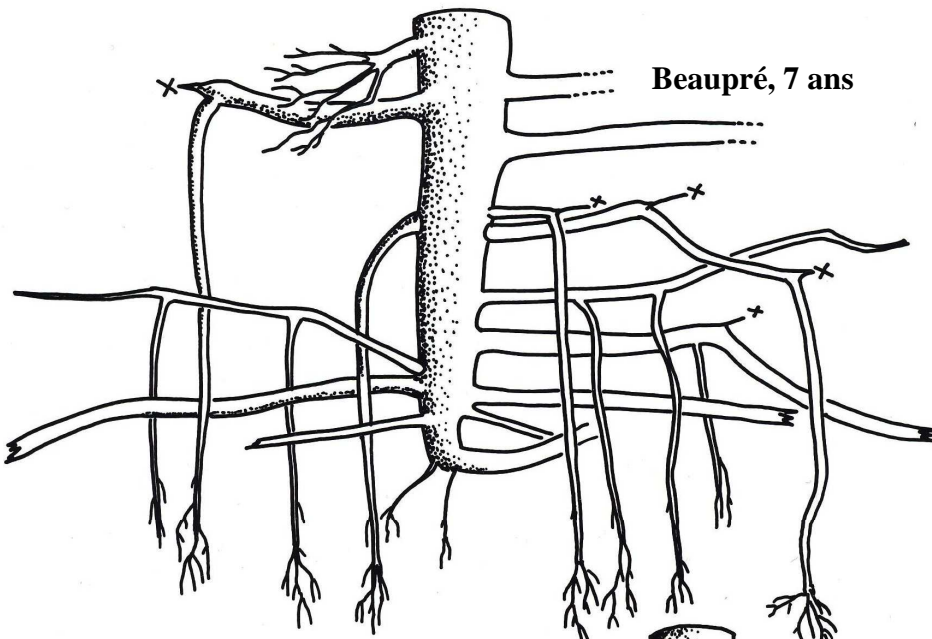


I 214, 4 ans

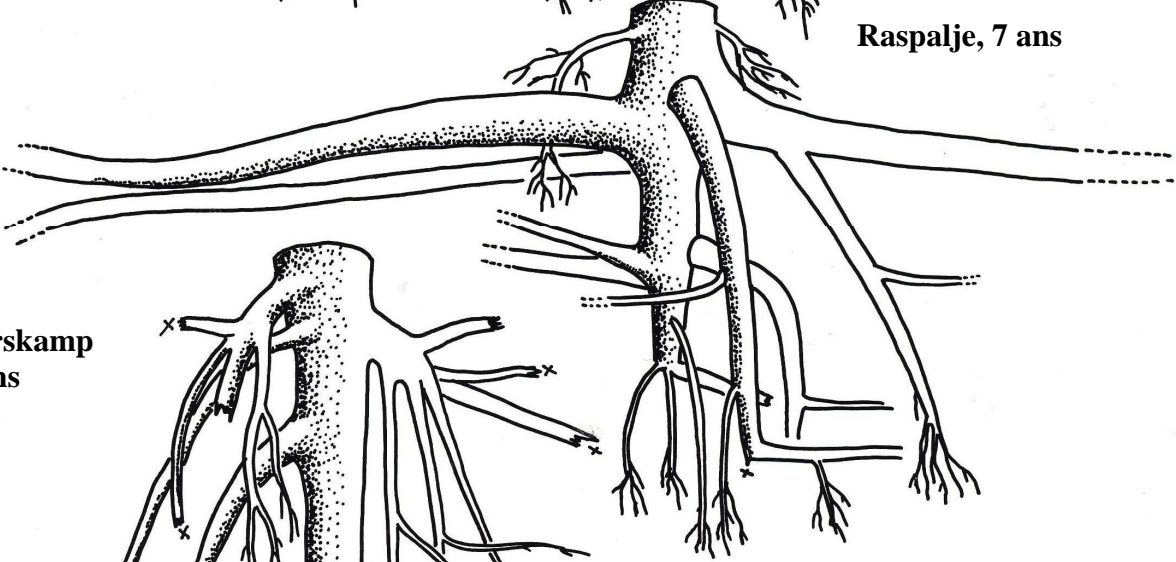


Dorskamp, 4 ans

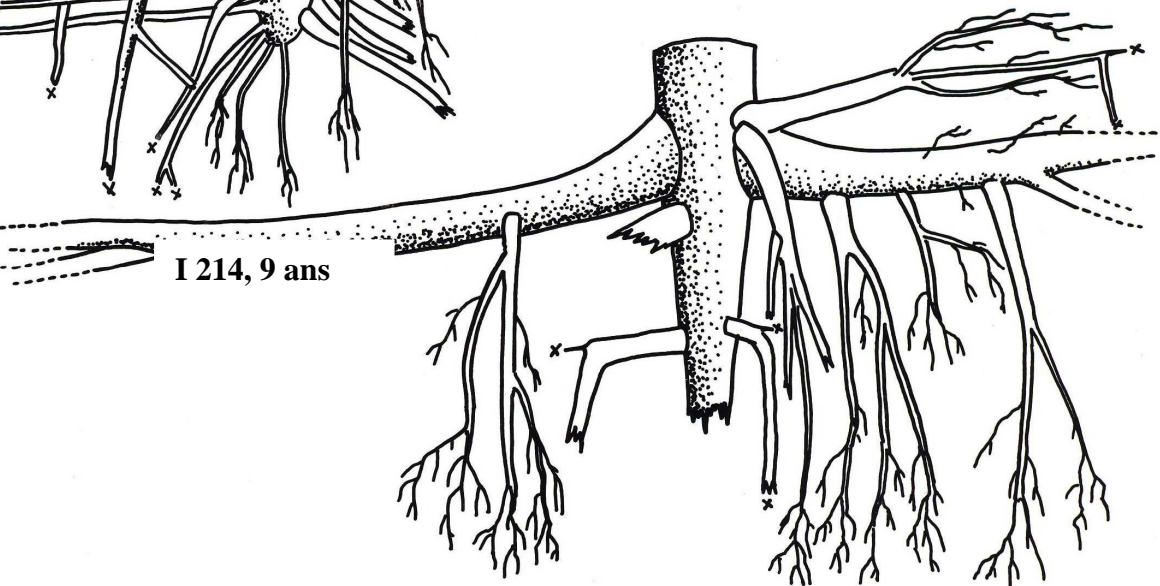
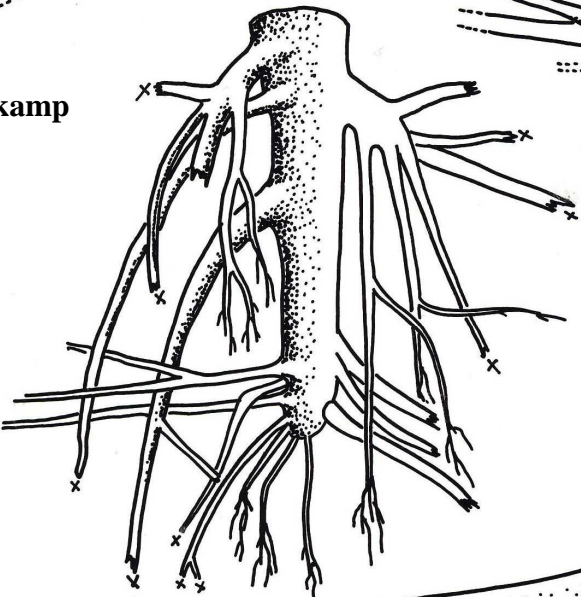




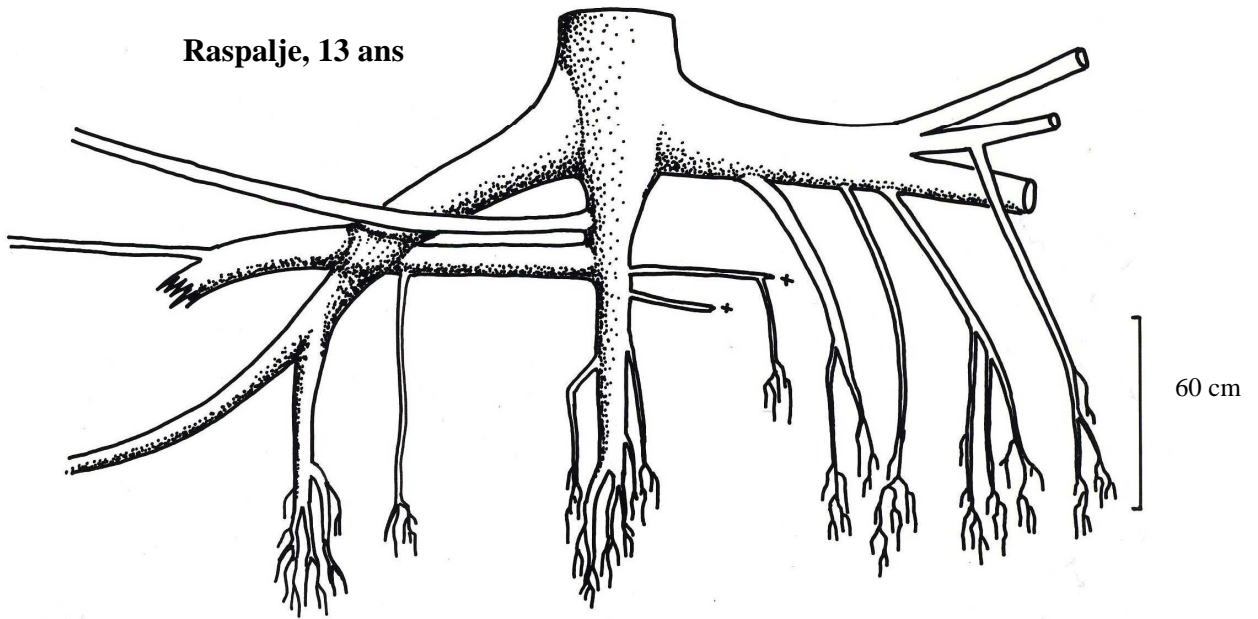
60 cm



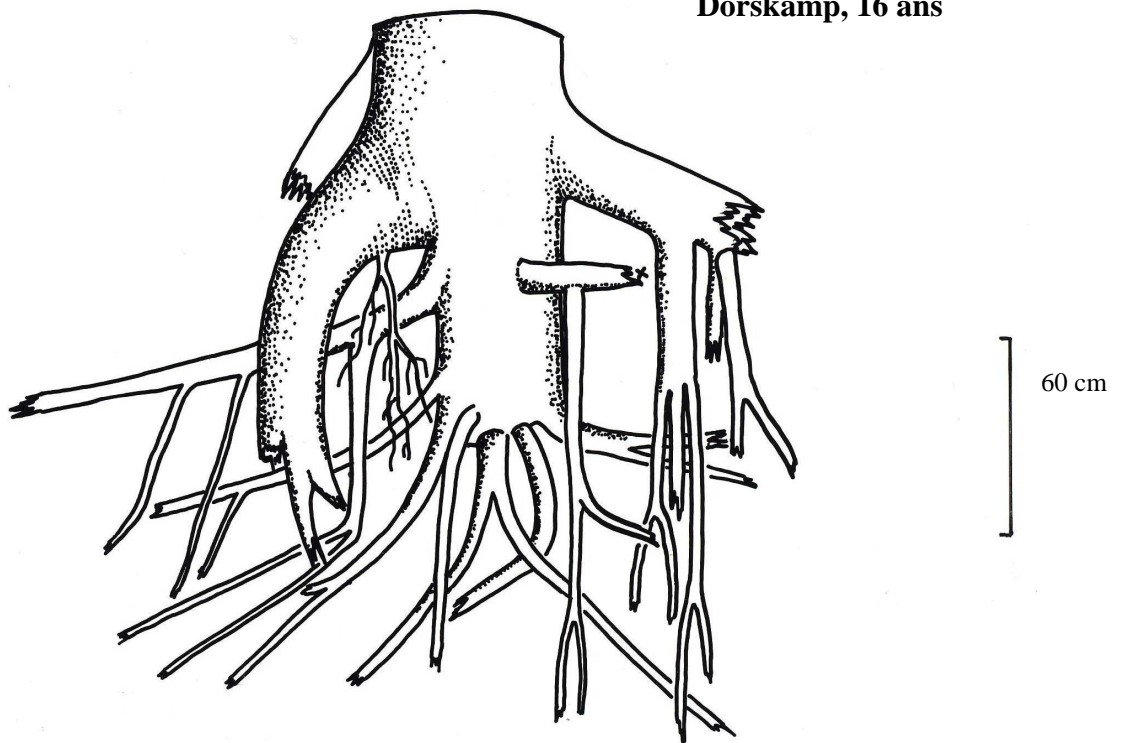
Dorskamp
8 ans



Raspalje, 13 ans



Dorskamp, 16 ans



- PARTIE VIII -

MODELISATION DE L'ANCRAGE (2004)

VIII.1 – Analyse numérique de I 214 et de Dorskamp

(Thierry Fourcaud – LRBB)

Introduction

L'objectif de ce travail est d'analyser numériquement le comportement mécanique des systèmes racinaires des clones de peuplier I214 et Dorskamp qui ont fait l'objet d'essais préalables sur le terrain. La Méthode des Eléments Finis (MEF) a été utilisée. Cette étude fait suite aux travaux de Lionel Dupuy (Dupuy, 2003 ; Dupuy et al., 2004a ; Dupuy et al., 2004b) sur l'ancrage racinaire des arbres forestiers réalisés dans le cadre de sa thèse. Elle reprend et approfondi également les travaux de Fourcaud et al. (2003) réalisés dans le cadre du précédent projet « Le Pin et le Vent : stabilité mécanique du Pin maritime ».

Modélisation numérique par la MEF

La MEF est une méthode numérique qui consiste à résoudre les équations de la physique en décomposant le domaine d'étude en petits domaines élémentaires, ou encore *éléments*, et en interpolant le champ des variables inconnues à partir de leur calcul en des points particuliers appelés *nœuds*, issus de cette décomposition spatiale ou *discrétisation*. Dans le cas de la résolution d'un problème d'équilibre mécanique, le domaine d'étude correspond au système étudié, en l'occurrence ici l'ensemble racine/sol, et l'inconnue est le champ des déplacements dans l'espace des points matériels de ce système lorsqu'il est soumis à des forces extérieures connues. La connaissance du champ de déplacement permet de remonter au champ des déformations, puis au champ des contraintes mécaniques internes. La MEF fait appel à des fondements théoriques qui ne seront pas développés ici, mais dont on pourra trouver les détails dans de nombreux ouvrages, en particuliers dans Zienkiewicz et Taylor (1989). Les analyses présentées dans ce rapport ont été réalisées avec le code de calculs Eléments Finis Abaqus (Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., <http://www.abaqus.com>). Deux types de modèles ont été développés pour cette étude :

1- Un Modèle intégrant le sol (Modèle 1) :

Ce modèle est constitué d'un système racinaire plongé dans une matrice de sol. Les interactions entre le sol et les racines sont définies en assurant la compatibilité des déplacements entre les nœuds de racines et les nœuds du sol les plus proches. Cette technique a été développée dans le cadre de la thèse de Lionel Dupuy (2003). Elle ne permet pas de simuler le comportement à l'interface (glissement, décohésion sol/racine) qui est techniquement difficile et lourd à modéliser en 3D. D'autre part, il n'existe pas d'éléments d'interface entre des éléments de poutres et des solides 3D dans la version d'Abaqus standard qui a été utilisée.

2- Un modèle d'éléments de poutre 3D avec support élastique (Modèle 2) :

Des éléments de poutre sur support élastique ont été utilisés comme alternative au modèle 1. Cette technique permet de faire abstraction du maillage du sol tout en prenant en compte les pressions radiales exercées par celui-ci sur les éléments de racines. Elle est fréquemment utilisée en géomécanique pour le calcul des fondations.

Maillage

La première phase de l'analyse consiste à discrétiser le domaine racines/sol en éléments finis. Pour cette phase de *maillage*, il faut distinguer le système racinaire, constitué d'éléments de structure longilignes appelés éléments de poutres, de la matrice de sol qui peut être représentée par des éléments 3D solides (ceci uniquement dans le modèle 1).

Le maillage du sol est effectué avec des éléments solides 3D hexaèdres de type C3D20 (Hibbitt et al., 2003) à 20 nœuds.

Le maillage des systèmes racinaires est réalisé en utilisant des éléments de poutre 3D à champ de déplacement linéaire de type B31 à 2 nœuds. C3D20 à 20 nœuds.

Dans le cas du modèle 2, le sol n'est pas explicitement représenté. Il est pris en compte en considérant que les éléments de poutre sont insérés dans une matrice élastique isotrope de module de réaction linéique k_s . La procédure FOUNDATION d'Abaqus est utilisée en donnant des valeurs k_s égales dans les trois directions globales.

Passage MTG/Abaqus

Un outil de maillage développé sous MatLab a été développé spécifiquement pour créer un fichier de commande Abaqus *analyse.inp* à partir des données topologiques et géométriques codées sous un format MTG (Godin et al., 1999). Le maillage des racines en élément de poutres est donc issu des données topologiques, le maillage du sol étant réalisé (si nécessaire) de façon autonome en considérant un volume parallélépipédique englobant l'ensemble du système racinaire. La liaison entre les racines et le sol est réalisée en imposant des déplacements compatibles entre les nœuds des deux milieux grâce à l'utilisation de la commande MPC d'Abaqus. Une description de cette méthode est donnée dans Dupuy et al. (2004).

Les fichiers retenus pour l'analyse faisaient parfois apparaître des diamètres de racines nuls. Ces erreurs ont été corrigées automatiquement en prenant le diamètre du segment précédent ou 2/3 du segment porteur dans le cas du départ d'une ramification.

Orientations

Le codage des systèmes racinaires a été réalisé par rapport à un référentiel global Oxyz en choisissant l'origine O à la base du tronc, l'axe Oz dans la direction verticale ascendante et l'axe Ox dans la direction Nord. Les essais de flexion ont été réalisés dans des directions choisies en fonction de contraintes techniques liées principalement aux positions des arbres voisins et de l'arbre servant de point d'attache du câble. Ces directions sont données dans le tableau 1.

Pour des raisons pratiques, il a été nécessaire de réaliser une rotation de chaque système racinaire autour de l'axe Oz afin de faire correspondre la direction de traction avec l'axe Oy du repère global. Ces rotations ont été effectuées à partir des fichiers tabulaires en utilisant une fonction MatLab développée à cet effet.

Tableau 1 : orientation et hauteur du câble lors des essais de flexion réalisés sur le terrain. La rotation de l'axe 2 (ou Oy) est déterminée de façon à l'orienter dans la direction de traction.

Nom	orientation force (grad)	Rotation de l'axe 2	hauteur câble (m)
I214_9_1	95	-175,5	8
I214_9_2	85	-166,5	8
I214_9_3	85	-166,5	8,1
I214_14_1	60	-144	8,6
I214_14_2	60	-144	8,17
I214_14_3	50	-135	8?
Dorskamp8_1	75	-157,5	7,6
Dorskamp8_2	45	-130,5	7,2
Dorskamp8_3	70	-153	5,3
Dorskamp16_1	35	-121,5	12,95
Dorskamp16_2	35	-121,5	13
Dorskamp16_3	45	-130,5	13,7

Modèle mécanique

Modèle intégrant le sol (Modèle 1)

Les lois de comportement choisies sont classiques et reposent sur des hypothèses simplificatrices non contraignantes compte tenu du fait que les matériaux de l'étude (sol et bois) n'ont pas été caractérisés de façon précise.

Le comportement du sol est modélisé par une loi élasto-plastique définie par un critère de plasticité de type Druker Prager faisant intervenir comme paramètres la cohésion c , l'angle de frottement φ et l'angle de dilation Φ , en addition du module d'élasticité E_{sol} et du coefficient de Poisson ν_{sol} .

Le comportement du bois racinaire est choisi parfaitement élastique de module d'élasticité E_{rac} et de coefficient de Poisson ν_{rac} , avec un critère de rupture basé sur une contrainte axiale ultime σ_{seuil}^L . La prise en compte de la rupture est effectuée en comparant à chaque incrément de calcul i , la contrainte effective longitudinale ${}^e\sigma_i^L$ dans l'élément e avec la contrainte seuil σ_{seuil}^L .

La loi de comportement du bois racinaire dans l'élément e est alors définie par :

$$\begin{cases} \text{si } {}^e\sigma_i^L \leq \sigma_{\text{seuil}} & E_e^i = \min(E_e^{i-1}, E_{\text{rac}}) \\ \text{si } {}^e\sigma_i^L > \sigma_{\text{seuil}} & E_e^i = E_0 \end{cases} \quad \text{avec } E_e^1 = E_{\text{rac}} \text{ et } E_0 \approx 0$$

Ce critère est défini dans Abaqus via une procédure utilisateur.

Elements de poutre avec support élastique (Modèle 2)

Le bois racinaire reste caractérisé par son comportement élastique en utilisant les paramètres E_{rac} et ν_{rac} . Le critère de rupture σ_{seuil}^L est également conservé. Le module de réaction du support élastique est choisi égal dans les trois directions globales. On prendra $k_s=2E_{sol}$ selon les préconisations de Pyke (1984), où E_{sol} est le module élastique du sol considéré.

Chargements et conditions aux limites

Un déplacement dans la direction de traction Oy est imposé en un point situé par défaut à 8m du sol. La variable calculée est donc la force de réaction s'opposant au déplacement du point de traction. Le choix d'imposer un déplacement et non une force a été fait pour des raisons techniques. Cela permet en effet d'obtenir la courbe de réponse force/déplacement au delà du point de rupture du système, évitant ainsi de mettre en œuvre des techniques numériques lourdes telle que la méthode de Riks par exemple.

Le tronc est représenté par une barre infiniment rigide de façon à bien découpler la composante de déplacement liée à la rotation de la plaque racinaire de celle due à la flexion de la tige.

Dans le cas du modèle 1, le système racinaire est solidaire du sol qui l'entoure grâce aux contraintes MPC imposées aux nœuds (cf. Maillage ci-dessus). La face inférieure du domaine de sol est encastree, c'est-à-dire que tous les degrés de liberté des nœuds sont forcés à 0. Les 4 faces latérales sont bloquées seulement dans les directions latérales, ce qui permet aux nœuds de se déplacer librement dans la direction verticale et de tourner autour de la normale. La face supérieure n'est pas contrainte et peut se déformer librement.

Dans le cas du modèle 2, chacune des extrémités racinaires sont encastrees. La conséquence attendue de ce modèle est de très largement rigidifier la structure.

Analyse des résultats

Seuls 10 systèmes racinaires (6 x I214 et 4 x Dorskamp) ont été étudiés. En effet, seuls les systèmes racinaires codés en MTG et rigoureusement orientés par rapport à la direction de traction ont été retenus. D'autre part, certaines données MTG n'ont pas pu être analysées en raison de la présence d'erreurs de codage qui n'ont pu être corrigées.

Les calculs sont effectués en analyse non linéaire, c'est-à-dire de façon incrémentale sur la variable de déplacement. La variable calculée est la force de réaction au point de traction. Il est ainsi possible de tracer la courbe de réponse de la structure qui est représentée par la courbe force/déplacement déterminée en ce point.

Les critères de comparaison retenus sont la rigidité de la structure donnée par la pente initiale de la courbe de réponse, ainsi que la force maximale sur l'intervalle de déplacement choisi qui correspond à la résistance du système. Pour pouvoir être comparés, ces critères seront normalisés en divisant par le poids des systèmes racinaires qui a été estimé à partir des données géométriques contenues dans les MTG (cf. tableau 2).

Pour chacun des modèles présentés, une analyse numérique de sensibilité au maillage a été réalisée. Ces analyses permettent de vérifier la cadre d'application des résultats obtenus (qualitatifs, quantitatifs, possibilité de comparaisons entre les systèmes).

Les courbes de réponses numériques sont ensuite comparées avec celles déterminées par les essais de flexion réalisés sur le terrain. Ceci nécessite de redéfinir les hauteurs du point d'application de la charge afin qu'elles correspondent aux hauteurs d'attache du câble.

Une deuxième série d'analyse est effectuée en considérant la hauteur de traction à sa valeur par défaut H=8m, afin de comparer et éventuellement discriminer les performances des systèmes racinaires étudiés.

Tableau 2 : poids des systèmes racinaires

système	I214_9_1	I214_9_2	I214_9_3	I214_14_1	I214_14_2	I214_14_3	dorsk8_1	dorsk8_2	dorsk16_1	dorsk16_2
poids total (N)	3433	1897	2363	3207	3099	3064	2390	2433	10019	3307

Résultats

Analyses de sensibilité au maillage

Modèle 1

Les analyses de sensibilité au maillage ont été réalisées à partir du système racinaire I214_14_3 (cf. annexe). Les données pour les calculs sont fournies dans les tableaux 3 et 4. Le nombre d'éléments est calé sur la dimension des poutres qui varie de 20cm à 10cm.

Tableau 3 : données racines pour l'analyse de sensibilité du modèle 1.

Test N°	MTG	Longueur min (m)	Longueur max (m)	Densité (Kg/m3)	MOR tension (MPa)	MOR compression (MPa)	MOE (MPa)
1	rota_I214_14_3	0.20	0.20	800	35.0	-35.0	2000
2	rota_I214_14_3	0.15	0.15	800	35.0	-35.0	2000
3	rota_I214_14_3	0.10	0.10	800	35.0	-35.0	2000

Tableau 4 : données sol pour l'analyse de sensibilité du modèle 1.

Test N°	Type sol	Nombre d'éléments	Cohésion (KPa)	Angle phi (°)	Densité (Kg/m3)	MOE (MPa)
1	argile	256	20	0.0	2000	1000
2	argile	500	20	0.0	2000	1000
3	argile	2048	20	0.0	2000	1000

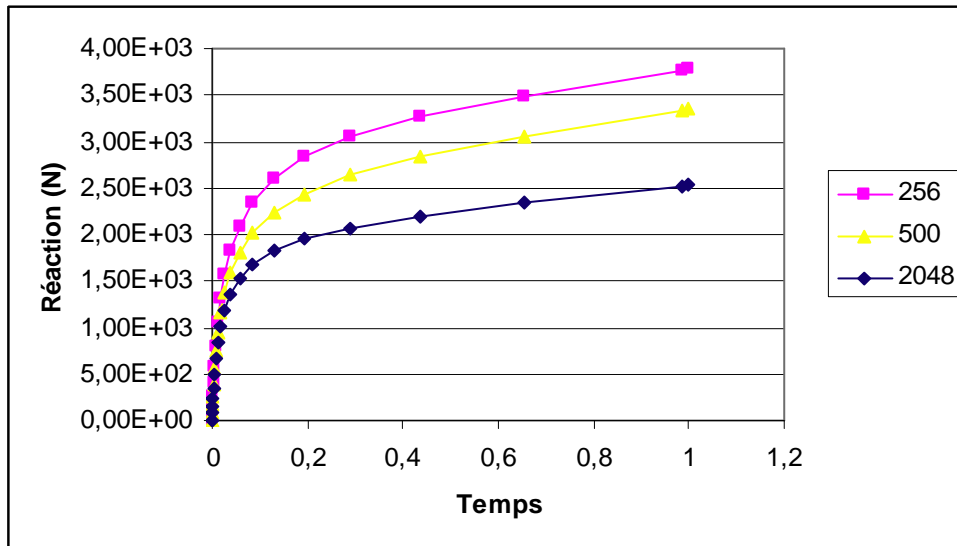


Figure 1 : analyse de l'influence du maillage sur la réponse mécanique calculée.

Les courbes de réponses données figure 1 ne permettent pas de conclure que le modèle converge lorsque l'on affine le maillage. Les capacités actuelles de calcul que nous avons à notre disposition ne permettent pas d'aller au-delà dans l'analyse. Dans la suite, les calculs pour le modèle 1 seront réalisés en prenant des tailles d'éléments de poutre égales à 15cm, ce qui correspond au test 2 (500 éléments de sols) dans les analyses précédentes. Cependant, le défaut de convergence du modèle doit amener à relativiser les conclusions qui pourront être tirées, en particulier lors de la comparaison de systèmes différents. En revanche, les résultats qualitatifs potentiellement tirés de la cartographie des déformations plastiques dans le sol peuvent être considérés comme satisfaisant (cf. figure 2).

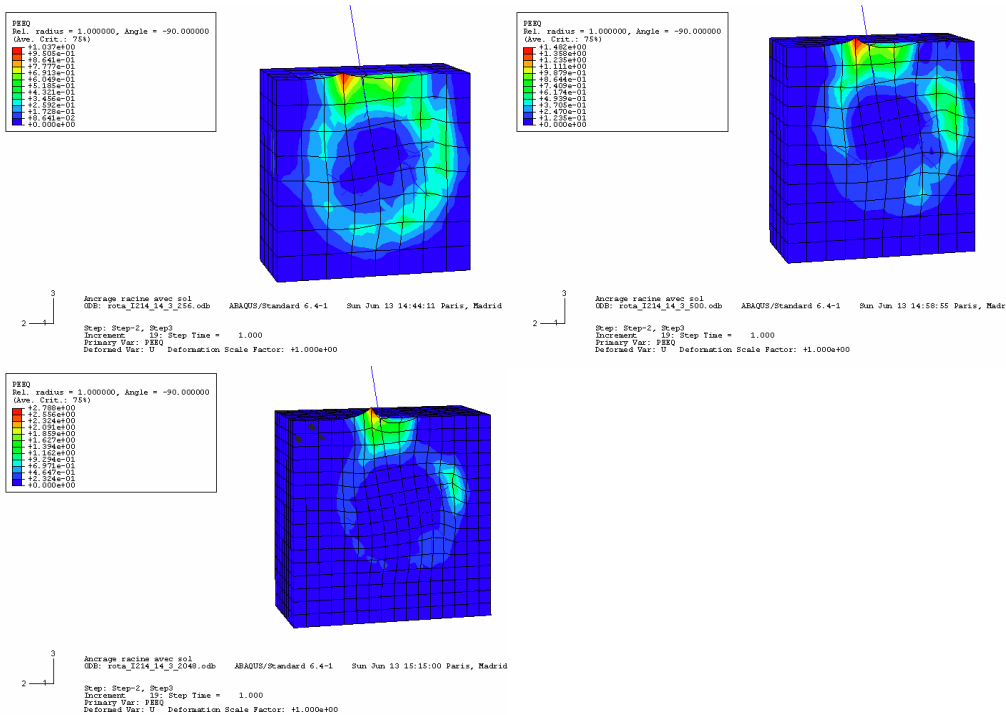


Figure 2 : déformations plastiques pour I214_14_3 avec 250, 500 et 2048 éléments de sol respectivement. Des zones de forte plasticité peuvent être localisées à proximité du collet sous le vent et plus en profondeur côté au vent. Ces résultats peuvent être comparés qualitativement dans chaque cas.

Modèle 2

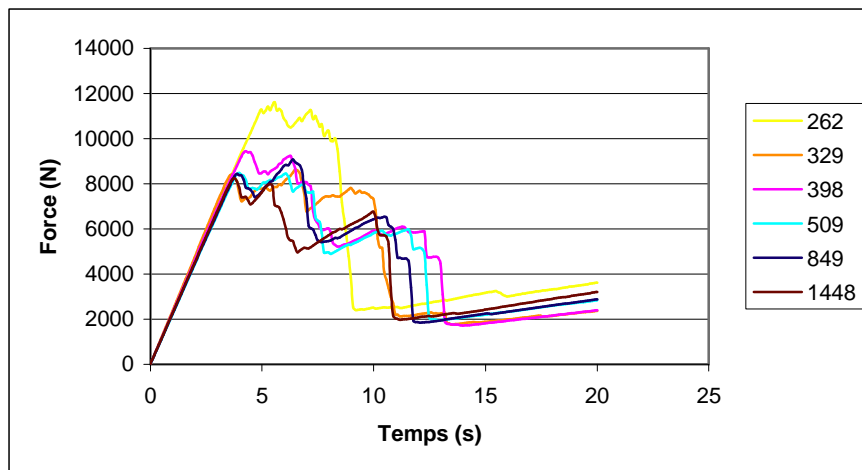


Figure 3 : analyses de sensibilité du modèles 1 au maillage en considérant les données fournies dans le tableau 1.

Les analyses de sensibilité au maillage pour le modèle 2 ont été réalisées en considérant les données fournies dans le tableau 5. Les courbes de réponses sont données figure 3 pour un nombre d'éléments de poutres variant de 262 à 1448. L'analyse de ces résultats montre que le

modèle converge pour le critère de rigidité. La prise en compte de la rupture des éléments entraîne une divergence des réponses au-delà du pic de rupture. Cependant, nous considérerons dans la suite que le modèle est acceptable pour des tailles d'éléments de poutre inférieures à 12 cm et qu'il permettra de comparer les réponses théoriques entre les différents systèmes étudiés.

Tableau 5 : données pour les analyses de sensibilité au maillage pour le modèle 4.

Test N°	MTG	Longueur min (m)	Longueur max (m)	Nb d'éléments	MOR tension (MPa)	MOR compression (MPa)	MOE (MPa)
1	rota_I214_9_1	0.05	0.05	849	20.0	-10.0	2000
2	rota_I214_9_1	0.10	0.10	398	20	-10	2000
3	rota_I214_9_1	0.15	0.15	262	20	-10	2000
4	rota_I214_9_1	0.08	0.08	509	20	-10	2000
5	rota_I214_9_1	0.12	0.12	329	20	-10	2000
6	rota_I214_9_1	0.03	0.03	1448	20	-10	2000

Résultats Modèles 1

Les données retenues pour les simulations numériques sont celles du test 3 répertoriées dans les tableaux 3 et 4. Les données mécaniques correspondent aux valeurs moyennes fournies par le LMS de Poitiers. Les premières analyses permettent de comparer les réponses pour l'ensemble des systèmes étudiés (figure 5). Les résultats en termes de résistances/poids fournis à la figure 6 mettent en évidence une différence de résistance au bénéfice du I214. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus expérimentalement lors des essais de flexion (cf. figure 13). Un effet âge est également observé pour les eux clones avec une perte d'efficacité au cours du vieillissement. Cet effet âge joue également pour la rigidité, alors qu'aucune différence notable n'est observée entre les clones pour ce critère (figure 7).

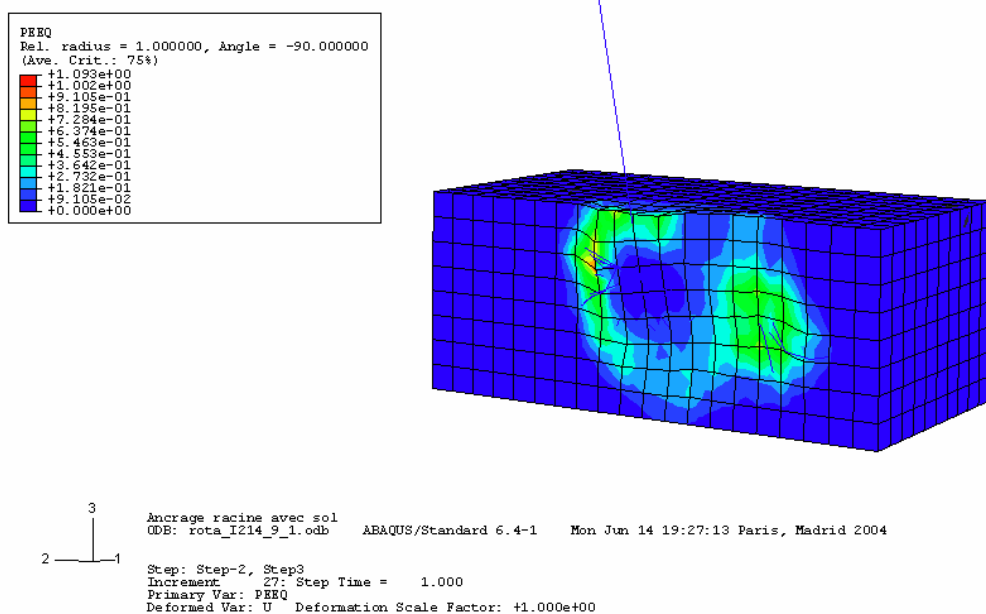


Figure 4 : déformations plastiques I214_9_1.

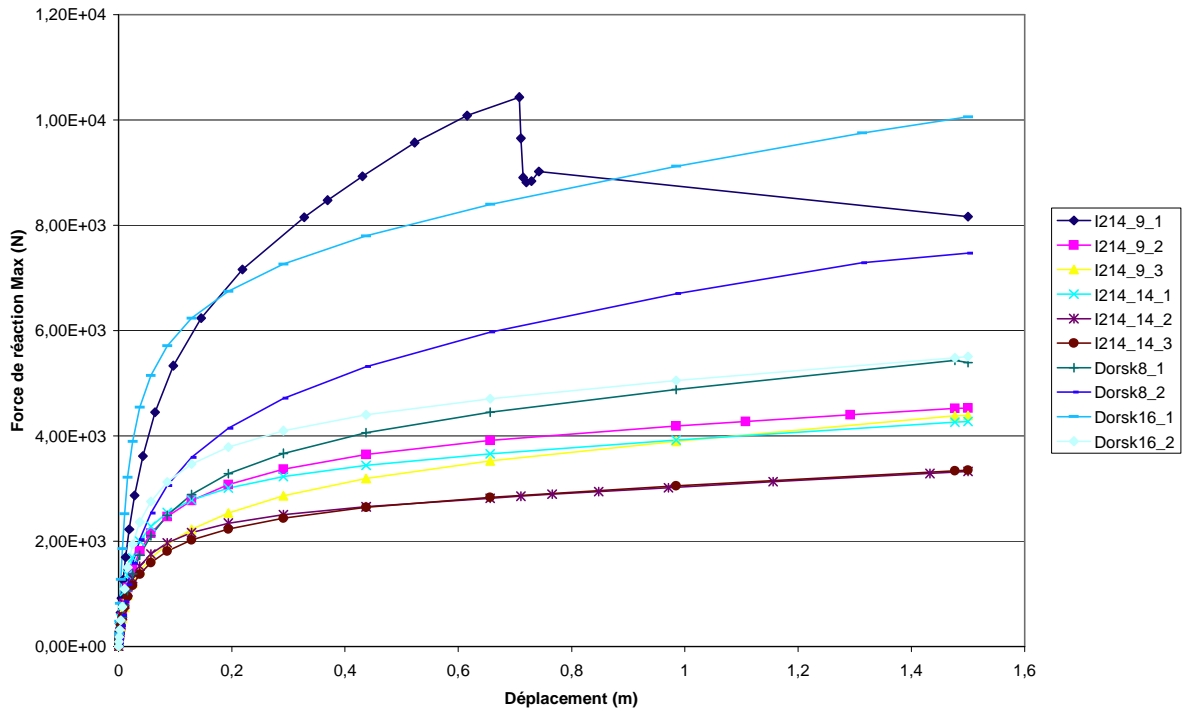


Figure 5 : courbes de réponse des systèmes racinaire dans le cas du modèle 1.

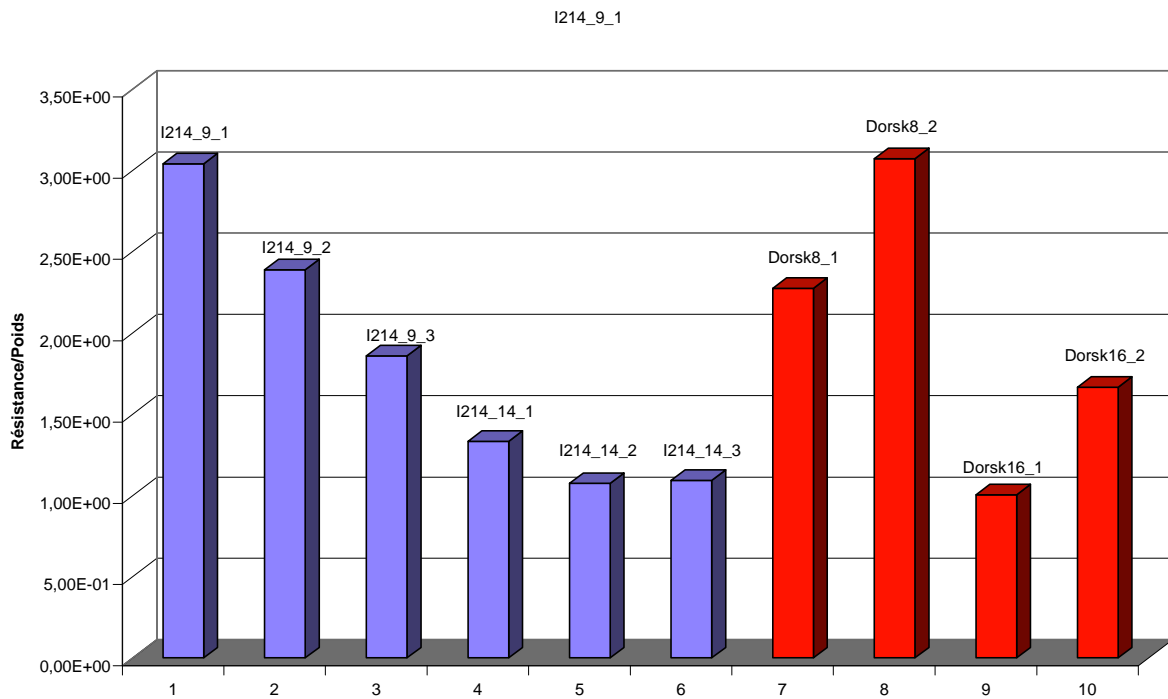


Figure 6 : comparaisons des rapports résistance/poids pour chaque système racinaire étudié.

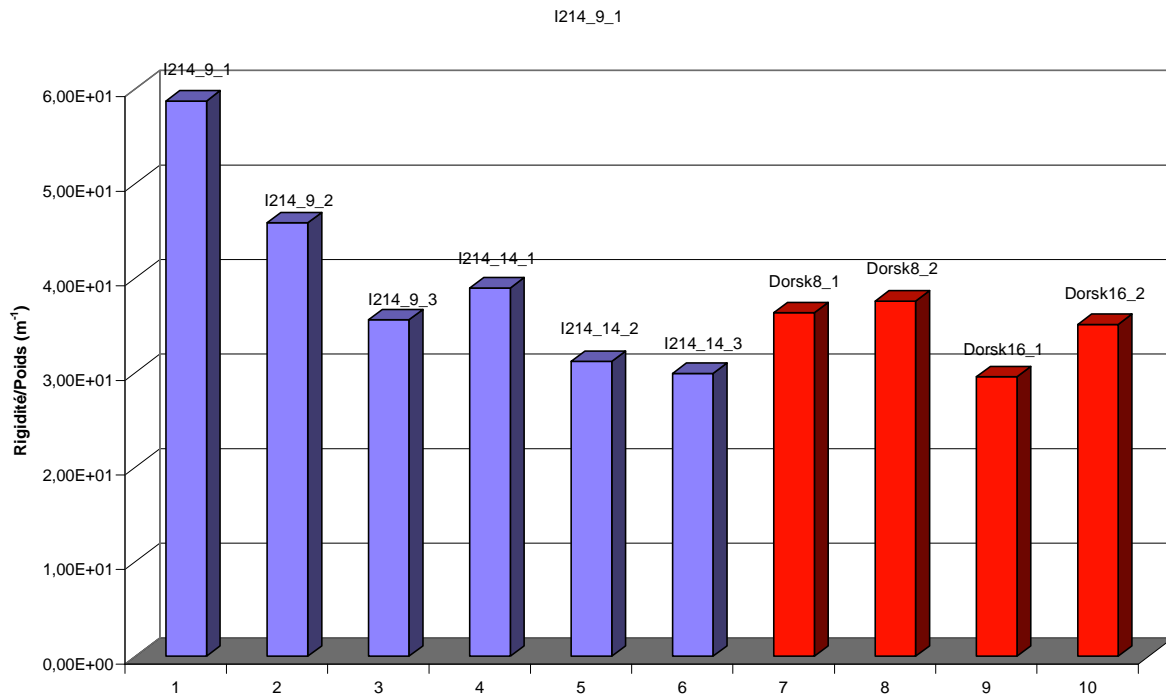


Figure 7 : comparaisons des rapports rigidité/poids pour chaque système racinaire étudié.

Résultats Modèles 2

Les courbes de réponse résultant du modèle 2 sont présentées à la figure 8. Ces courbes sont comparées avec celles obtenues lors des essais de flexion menés sur le terrain. Les résultats numériques surestiment très fortement les rigidités et les forces de rupture par rapport aux valeurs mesurées, les résultats expérimentaux affichés dans la figure 8 sont réduits en divisant les déplacements par 6 et les forces résultantes par 2,5, ceci afin de permettre une comparaison qualitative.

Ces résultats ne sont pas satisfaisants.

Comparaisons avec les essais de flexion

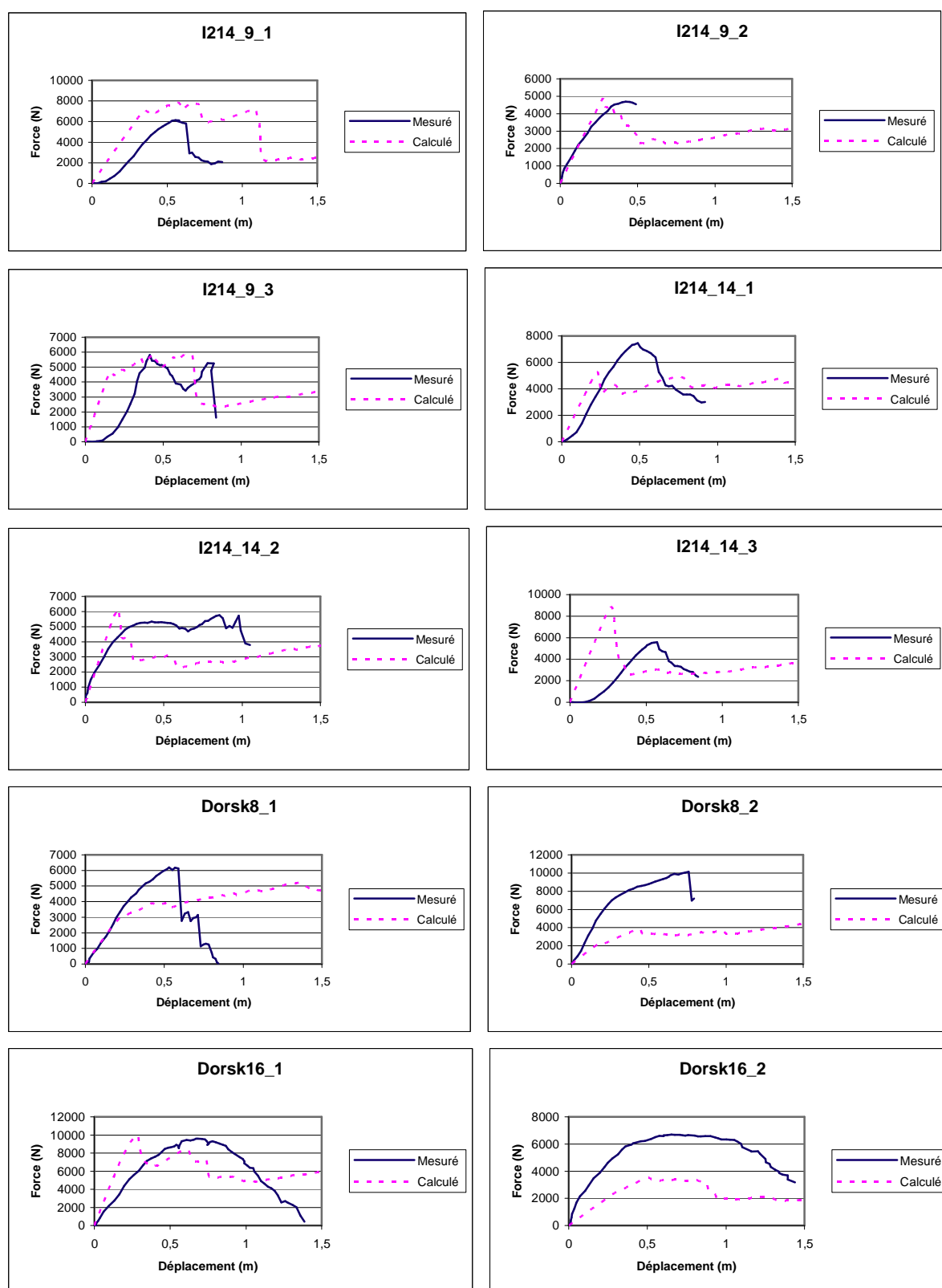


Figure 8 : courbes de réponse calculées et mesurées (données A. Stokes, LRBB) pour l'ensemble des systèmes racinaires digitalisés.

Comparaisons numériques entre les structures racinaires

Les calculs numériques révèlent une différence significative des résistances normalisées par le poids des racines entre les cultivars I214 et dorskamps pour le sol le plus souple ($P=0,032$). Contrairement aux conclusions tirées pour le modèle 1, les dorskamp semblent être moins résistant et moins rigides (figures 9 et 11). Ceci est en contradiction avec les résultats expérimentaux (figure 13).

En revanche, aucunes différences significatives n'apparaissent pour le sol rigide.

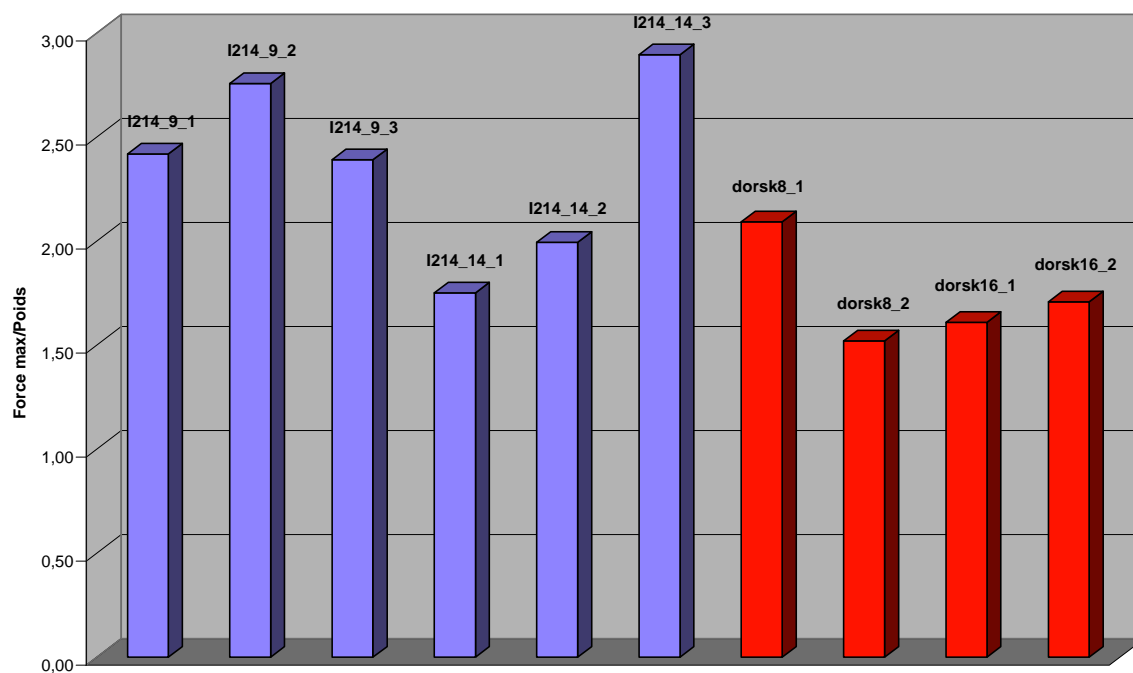


Figure 9 : résistances à la flexion calculées avec le modèle 2 et $k_s=0.2\text{MPa}$.

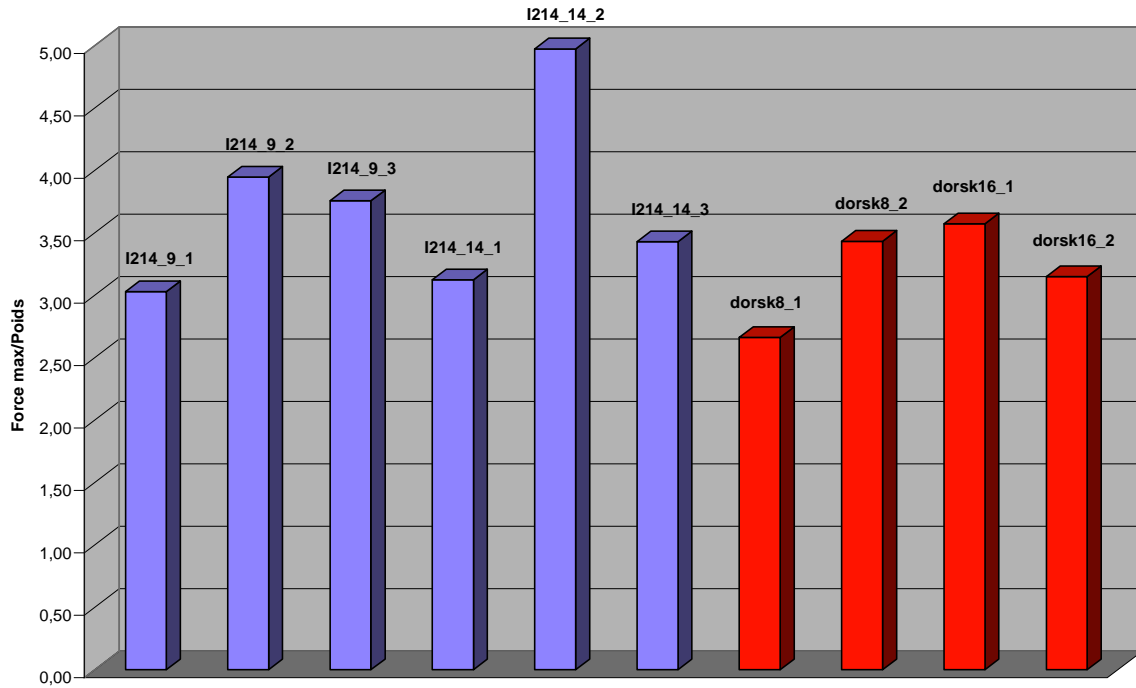


Figure 10 : résistances à la flexion calculées avec le modèle 2 et $k_s=2.0$ MPa.

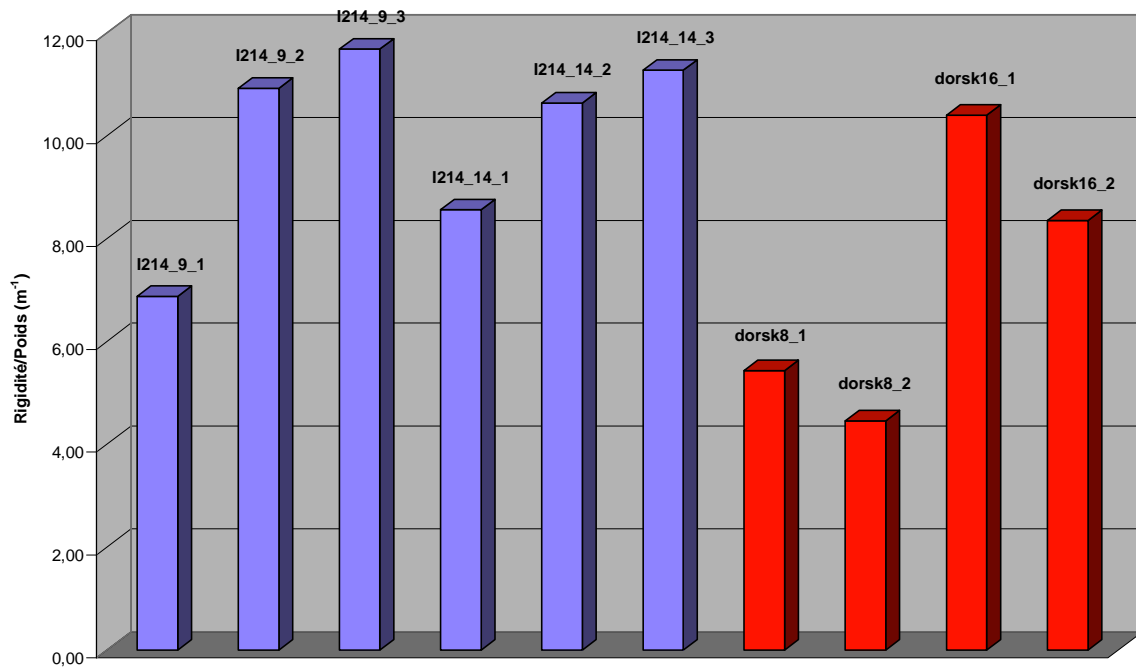


Figure 11 : rigidités à la flexion calculées avec le modèle 2 et $k_s=0.2$ MPa.

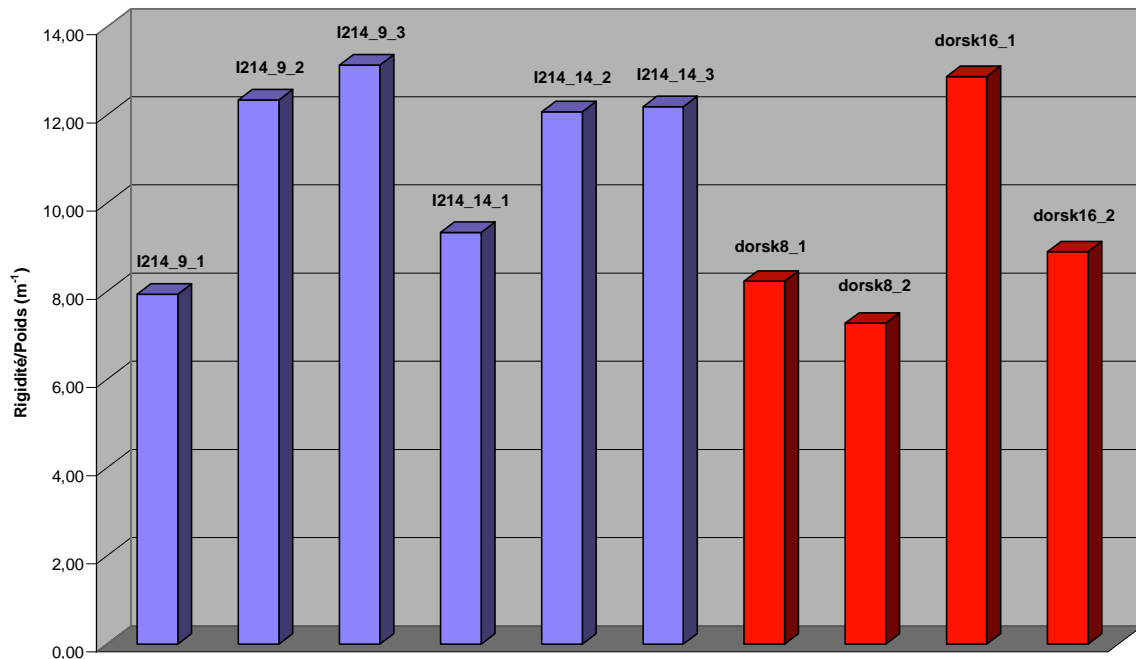


Figure 12 : rigidités à la flexion calculées avec le modèle 2 et $k_s=2.0$ MPa.

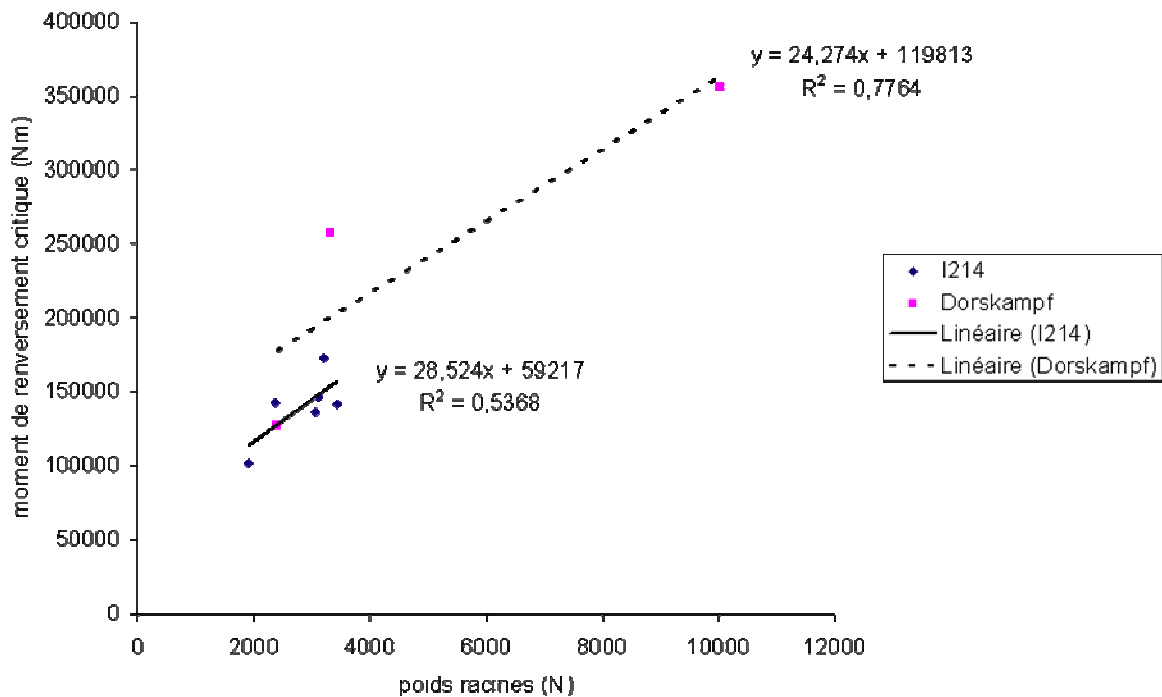


Figure 13 : moment de renversement vs poids des racines à partir des tests de déracinement effectués sur I214 et dorskampf (données A. Stokes, LRBB)

Conclusion

Les conclusions à tirer de cette étude portent d'une part sur les comparaisons entre les modèles numériques et les essais de flexion menés sur le terrain, d'autre part sur les différences de comportements mécaniques calculés entre cultivars et âges des arbres.

Après une analyse numérique des deux modèles développés, le choix s'est porté sur l'utilisation du modèle 2 (poutres sur supports élastiques) plus fiable pour comparer les calculs entre eux.

Les comparaisons entre résultats numériques et essais de flexion ont porté sur des critères classiques basés sur l'analyse des courbes forces/déplacement qui caractérisent le comportement mécanique global des structures étudiées. Nous nous sommes intéressés à l'allure générale de cette courbe, à sa pente dans sa partie élastique linéaire qui définit la rigidité de structure, et enfin à la force maximale appliquée avant la ruine qui correspond au niveau de résistance de la structure. Il apparaît que les résultats obtenus par le calcul sont très différents de ceux fournis par les essais de flexion in situ. Ceci est vrai si l'on compare arbre à arbre, mais aussi lorsque l'on regarde les critères relatifs et leur classement sur l'ensemble des arbres. Ces résultats étaient attendus compte tenu des nombreuses sources d'erreurs possibles :

- erreurs liées à la simplification des modèles numériques (obligatoire compte tenu de la complexité du système étudié), avec en particulier la non prise en compte des comportements à l'interface sol/racines dans les modèles, la simplification des conditions aux limites dans le cas des éléments de poutre sur support élastique et la non prise en compte de l'hétérogénéité du sol;
- absence de caractérisation fine du sol (de toute façon difficile à réaliser compte tenu de la forte hétérogénéité reconnue de ce type de milieu) ;
- utilisation de valeurs moyennes pour les caractéristiques mécaniques des racines qui sont connues pour leur très forte variabilité inter-arbre ;
- fortes incertitudes sur la représentation des systèmes racinaires liées d'une part à la perte d'éléments de racines lors des processus d'extraction, d'autre part au codage lui-même (données parfois douteuses en particulier en ce qui concerne les orientations, valeurs de diamètres erronées, certains fichiers MTG illisibles par les modules de maillage) ;
- incertitudes inhérentes aux essais de flexion.

Il est toutefois important de noter que ces divergences entre modèles et réalité sont extrêmement courantes en mécanique des sols et en géotechnique en raison de la complexité des systèmes à étudier et des caractéristiques mêmes du sol. Elles ne sont cependant pas nécessairement pénalisantes selon l'objectif que l'on veut atteindre. L'intérêt principal de l'utilisation de tels modèles est justement de s'affranchir de cette complexité en séparant les différents facteurs potentiellement responsables des chablis. En particulier, ils peuvent amener des informations qualitatives précieuses sur les mécanismes de déracinement ou sur l'effet de la morphologie racinaire sur le comportement d'ancrage, toutes choses étant égales par ailleurs.

Ce commentaire justifie d'analyser de plus près les résultats obtenus par le calcul.

Il est impossible de discriminer nettement les comportements mécaniques en fonction des cultivars (dorskamp et I214) et des classes d'âges. Cette conclusion est également vraie lorsque l'on regarde les résultats issus des essais de flexion. Cependant, au regard des résultats du modèle 1 et des essais de terrain, on note une tendance à une plus forte résistance des I214. Ce résultat s'inverse lorsque l'on prend le modèle 2. Même s'il faut être prudent sur

la fiabilité des résultats numériques, cela laisse à penser que le facteur sol, qui prédomine dans le modèle 1, est le facteur le plus pertinent à considérer. En revanche, l'effet structure qui est fort dans le modèle 2 ne semble pas expliquer les résultats obtenus sur le terrain.

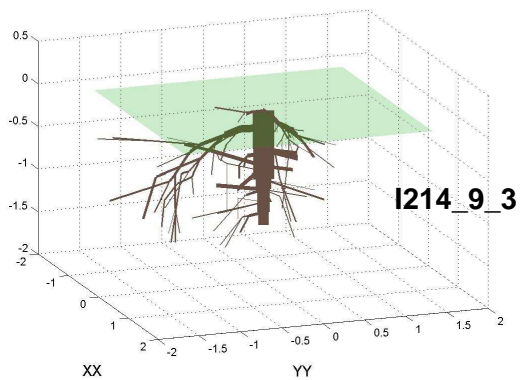
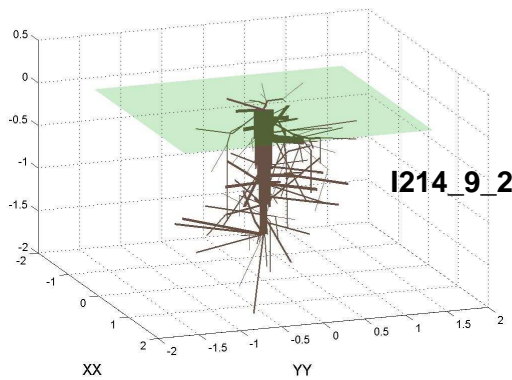
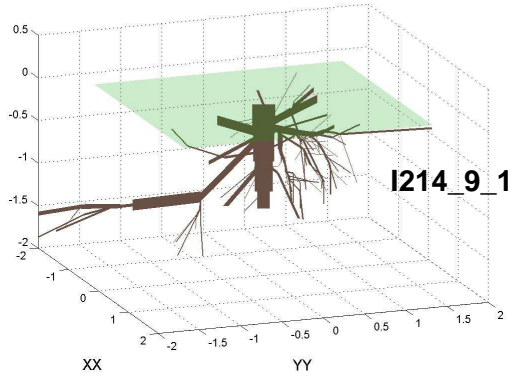
Quoi qu'il en soit, il eut été difficile de tirer des conclusions fiables compte tenu du faible nombre d'arbres analysés. Il serait intéressant par la suite de considérer les corrélations éventuelles entre la réponse mécanique de la structure et des paramètres morphologiques (distributions des racines en nombre, longueur, diamètre ou volume) extraits des analyses architecturales. Malheureusement ces données n'étaient pas toujours disponibles lors de la réalisation de cette tâche.

Malgré le peu d'informations vraiment pertinentes obtenues dans le cadre de ce projet, le développement et l'amélioration des modèles numériques mécanistes de type éléments finis méritent d'être poursuivis. Ils ont déjà apportés des informations qualitatives intéressantes lors d'études plus fondamentales menées dans le cadre de la thèse de Lionel Dupuy, en particulier en mettant en avant les mécanismes de rupture de la plaque racinaire selon les types de sols et/ou de systèmes racinaires considérés. Ils ont aussi permis de montrer l'importance d'éléments de structures remarquables, tels que le pivot par exemple, dont la contribution à l'ancrage est fortement dépendant du type de sol (Dupuy 2003, Dupuy et al. 2003a, Dupuy et al. 2003b, Fourcaud et al. 2003).

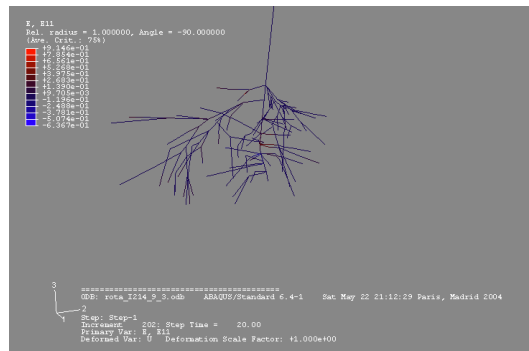
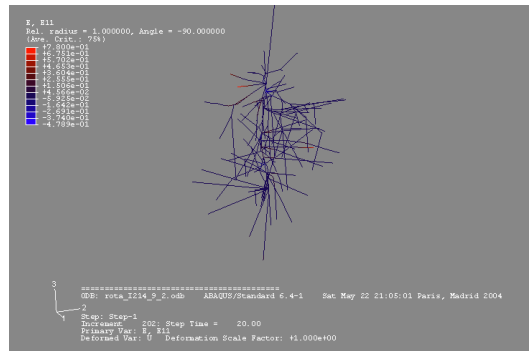
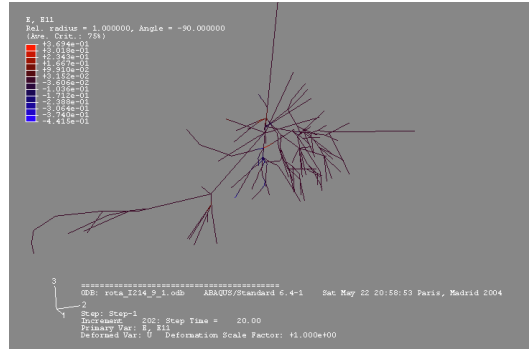
Le LRBB sait gré au GIP-ECOFOR des aides financières apportées à ces travaux et qui ont fortement contribué aux résultats obtenus, au-delà du cadre strict du présent projet. Ces résultats ont fait l'objet de publications dans des journaux scientifiques internationaux.

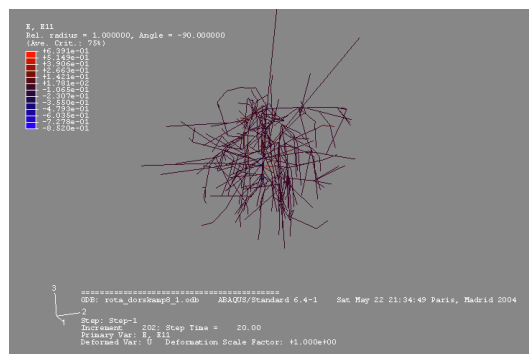
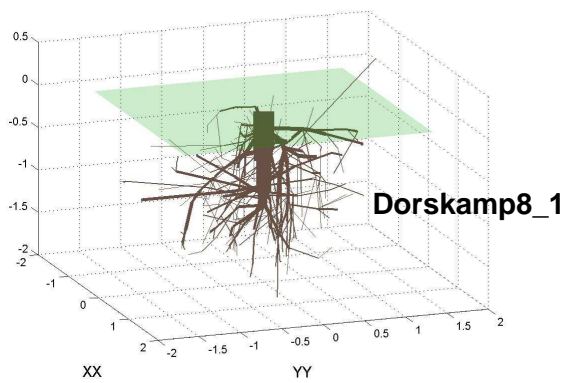
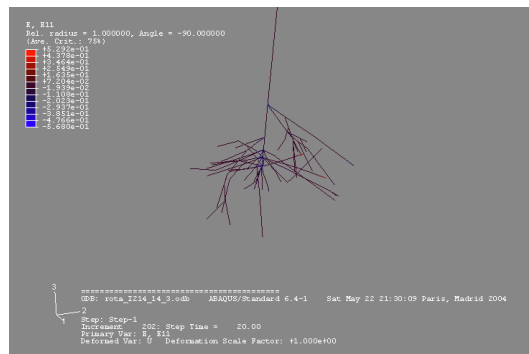
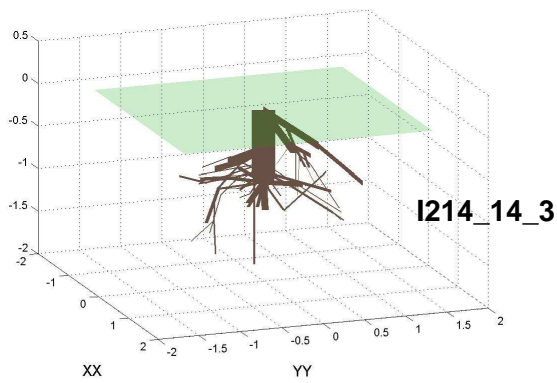
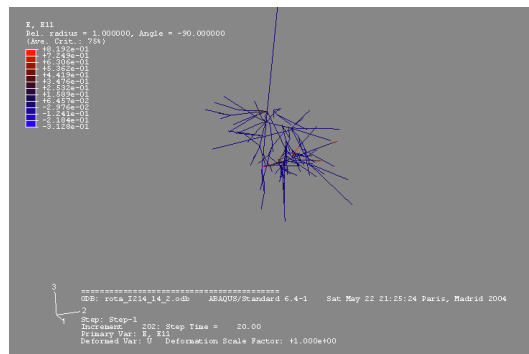
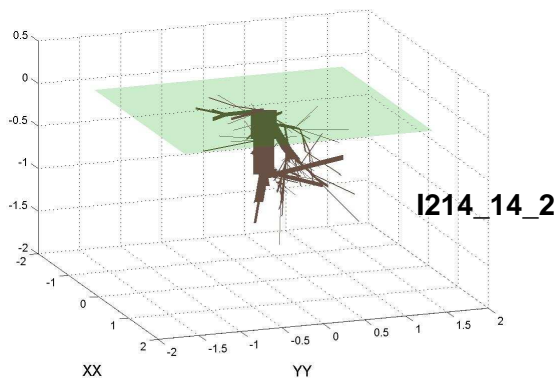
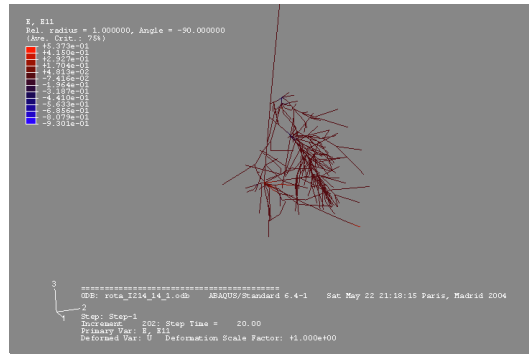
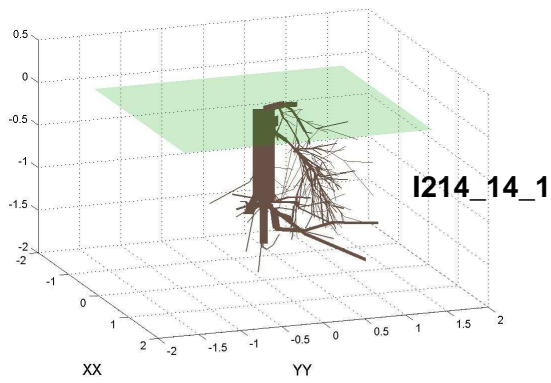
-- ANNEXE --

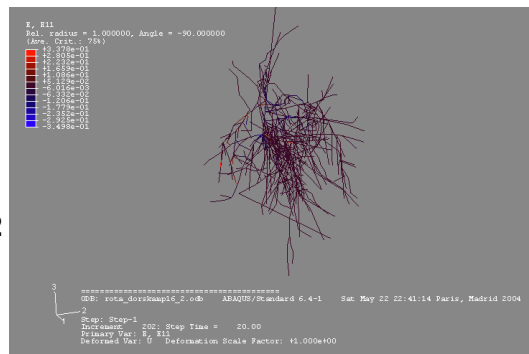
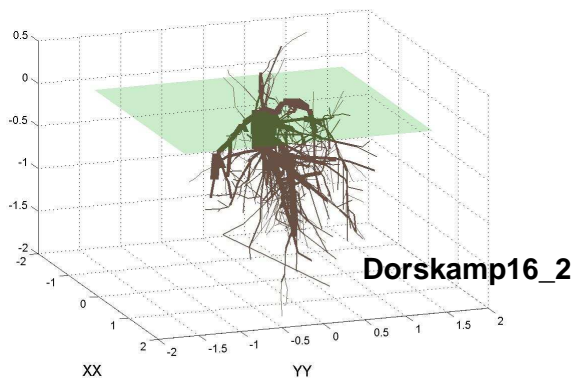
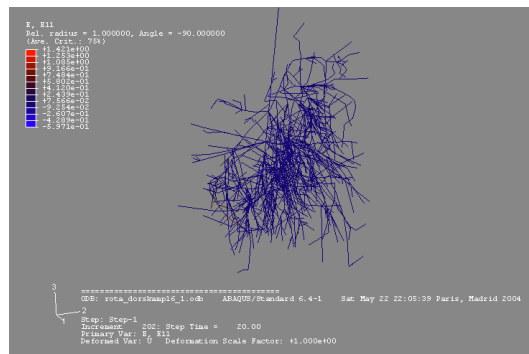
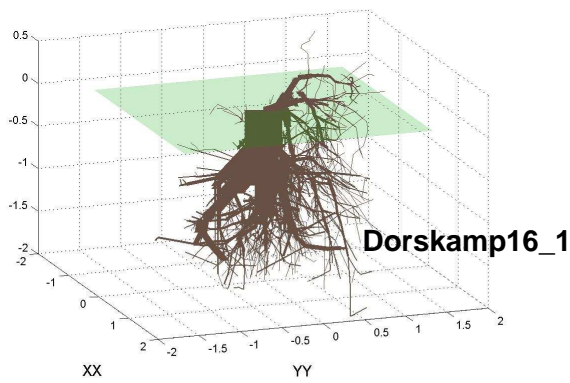
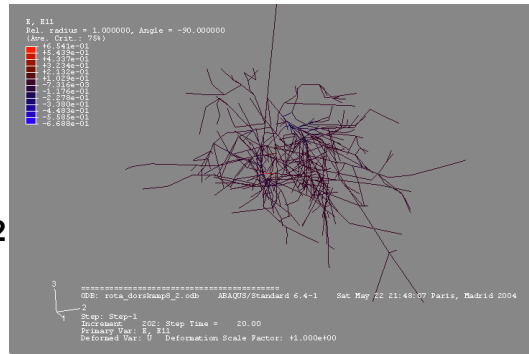
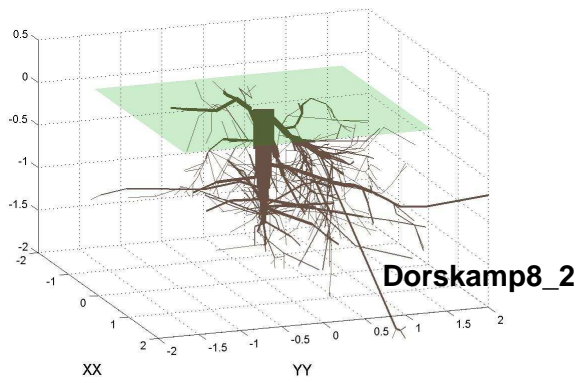
Représentation des systèmes racinaires mesurés



Résultats des analyses pour le modèle 2 (déformations E11)







VIII.2 Modélisation de portraits robots

(Thierry Fourcaud, LRBB)

Matériel et méthodes

Trois types de systèmes racinaires représentatifs de l'architecture des clones décrits dans le projet ont été analysés (Figure 1). Les données géométriques qui caractérisent ces racines schématisées sont fournies dans le tableau 1. Le protocole de simulations vise à déterminer la part relative d'éléments racinaires latéraux sur l'ancrage globale. Pour ce faire, les racines latérales, numérotées de 1 à 4 pour les types 1 et 2, et de 1 à 6 pour le type 3, ont été supprimées à tour de rôle pour les analyses numériques (Figure 1). Les structures étant symétriques par rapport à l'axe vertical x_3 , seules les racines portant des numéros pairs ont été enlevées tour à tour. L'influence des racines opposées, portant les numéros impairs, a été déterminée en inversant la direction de traction initiale.

Les calculs ont été réalisés par la méthode des éléments finis en utilisant le modèle 1 présenté dans le rapport final du projet. Rappelons que ce modèle prend en compte la description du sol. Les données utilisées pour les analyses sont fournies dans le tableau 2. Un déplacement dans la direction horizontale x_2 est imposé en un point du tronc modélisé par une poutre infiniment rigide. Les analyses quantitatives portent sur les courbes de réponse déplacement/force de réaction au point de traction, d'où sont extraites la rigidité et la force maximale calculées. Des analyses qualitatives portent sur la localisation visuelle de l'axe de rotation et sur la distribution spatiale des déformations plastiques dans le sol.

Résultats

Les analyses des champs de déformations plastiques (Figure 11) montrent clairement un plus grand volume de sol mobilisé dans le cas des systèmes racinaires de type 3 les plus ramifiés. Les racines horizontales du type 1 mobilisent un domaine de sol large et peu profond, contrairement aux racines obliques de type 2 qui sollicitent un domaine de sol plus étroit et plus profond.

Ces résultats se retrouvent lorsque l'on observe les positions des axes de rotation (Figure 2). Les axes les plus profonds sont ceux des systèmes de type 2 et les plus superficiels sont ceux de type 1. D'autre part, pour les systèmes T1, T2 et T3, plus l'axe de rotation est profond, plus il se rapproche du pivot. Pour la majorité des essais, les axes de rotation se trouvent du côté du pivot comportant un déficit de racines latérales, c-à-d du côté des racines de numéro pair. Dans le cas des types 1, la suppression des axes latéraux ne modifie pas la profondeur de l'axe de rotation. Ces derniers sont par ailleurs confondus pour les systèmes T1-2 et T1-3. Seule la suppression de l'axe 4 modifie la profondeur de l'axe de rotation des systèmes de type 3. La suppression des axes latéraux des systèmes de type 2 rehausse la position de l'axe de rotation, excepté pour l'axe 4 dans la direction x_2 pour lequel on observe un abaissement de cet axe.

L'analyse des courbes de réponses (Figures 3 et 4), dont ont été extraites les rigidités et les forces maximales de réaction (Figures 5 et 6), confirme les meilleures performances des systèmes racinaires de type 3 qui comportent un plus grand nombre de racines. A nombre de racines égal, le système T1 comportant des racines latérales horizontales est plus performant que le système T2 comportant des racines latérales obliques.

Les effets relatifs des racines latérales sur les rigidités et résistances des systèmes racinaires sont présentés aux figures 7-8 et 9-10 respectivement. Pour les systèmes de type 1 et 2, la suppression des axes 2 diminue la rigidité de 20% dans le cas des essais de traction dans la

direction x2. Toujours pour cette même direction, la force maximale de réaction diminue de 25% pour le type 1 et de 40% sur le type 2. La suppression des axes 4 n'a pas d'effet significatif sur les rigidités de ces deux types. En revanche, elle diminue de près de 10% la résistance des systèmes de type 1 sans affecter de façon significative la résistance des systèmes de type 2. Les axes 2 et 4 des systèmes racinaires de type 3 participent respectivement à 5% et 10% de la rigidité totale ainsi qu'à 20% et 15% de la résistance. En revanche, l'axe 6 n'a pas d'effet significatif sur ces deux critères. Lors des essais de traction dans la direction opposée -x2, la suppression de l'axe 2 diminue la rigidité des types racinaires 1 et 2 de 20% et 30% respectivement, et abaisse leur résistance de 35%. L'axe 4 n'a pas d'effet important sur ces critères pour ces deux types. Pour le type 3, la suppression des axes 2 et 4 ont un effet semblable de l'ordre de 10% sur la rigidité, mais provoque une diminution de respectivement 10% et 20% sur la résistance. L'axe 6 n'a pas d'impact significatif pour les deux critères.

Discussion

Le volume et la géométrie du sol mobilisé lors de la rotation de la plaque racinaire sont étroitement liés à l'orientation des racines latérales. **Les analyses numériques montrent que le diamètre de ce domaine de sol semble avoir un effet plus important que sa profondeur.** Les deux remarques précédentes expliquent la plus grande performance d'ancrage observée pour les systèmes racinaires possédant des racines latérales horizontales. Contrairement à ce que l'on peut supposer, la profondeur de l'axe de rotation, qui dépend étroitement de l'orientation des racines et donc de la forme de la plaque racinaire, n'a pas d'effet positif révélé sur la résistance de l'ancrage.

Les racines latérales les plus superficielles sont celles qui participent le plus à l'ancrage. Celles-ci étant dans tous les cas les plus éloignées de l'axe de rotation (voir figure 11), elles exercent des moments de forces qui s'opposent d'autant plus à la rotation du système. **La position de l'axe de rotation vis-à-vis des racines latérales semble donc être un facteur déterminant.** Cependant, la position de cet axe étant liée à l'orientation de ces mêmes racines via un effet de groupe faisant intervenir les propriétés du sol, il est difficile de prévoir le comportement d'ancrage à partir d'un simple critère morphologique.

Ces résultats sont certainement sensibles au type de sol considéré (ici argile). L'hypothèse de liaisons rigides entre le sol et les racines ne permet pas d'étudier l'effet d'un glissement éventuel à l'interface. D'autre part, il serait intéressant de reproduire ces analyses en faisant varier la rigidité à la flexion des racines.

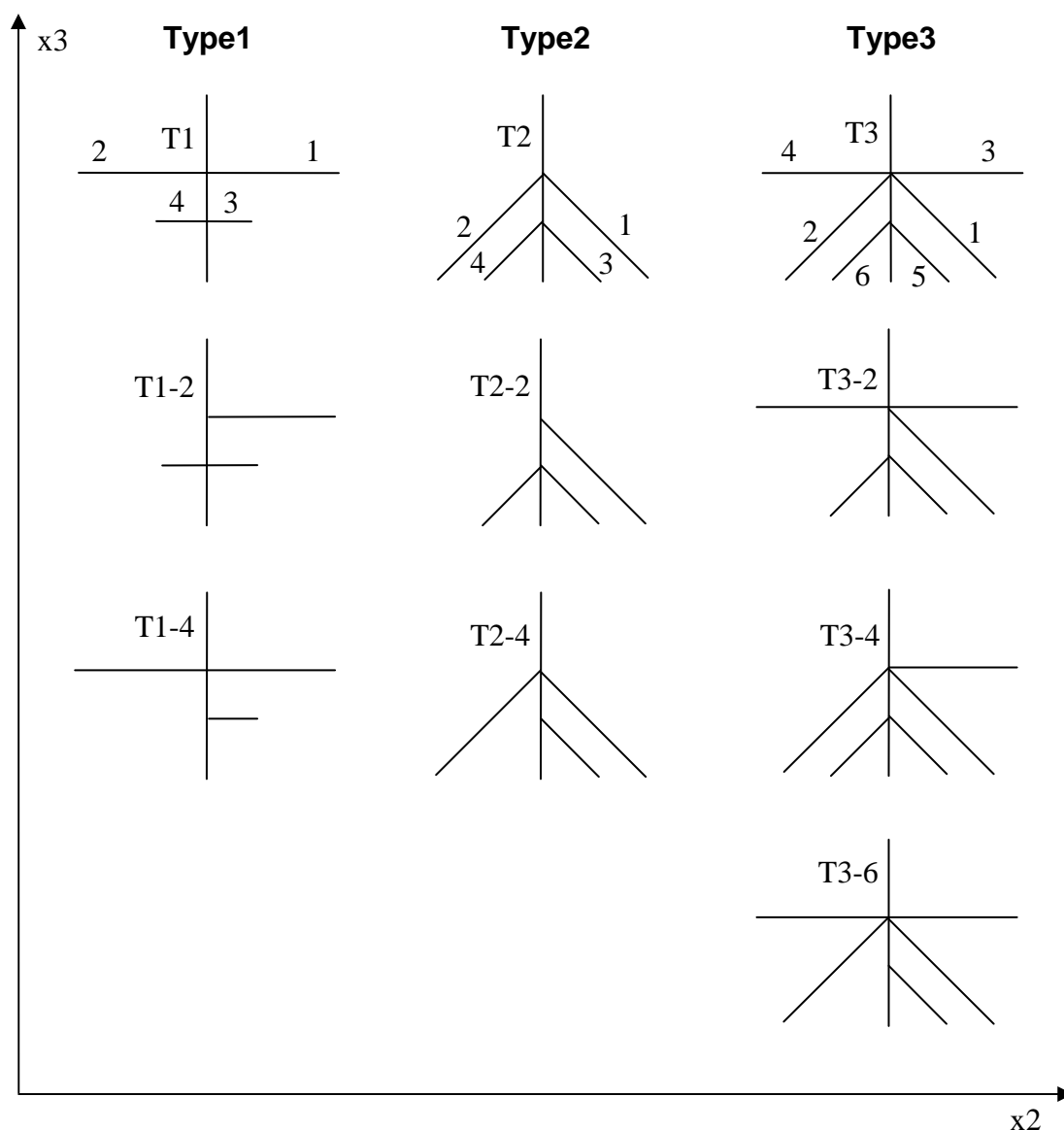


Figure 1 : description 2D des racines idéalisées de peupliers. Les calculs sont réalisés pour des essais de flexion dans les directions x_2 et $-x_2$.

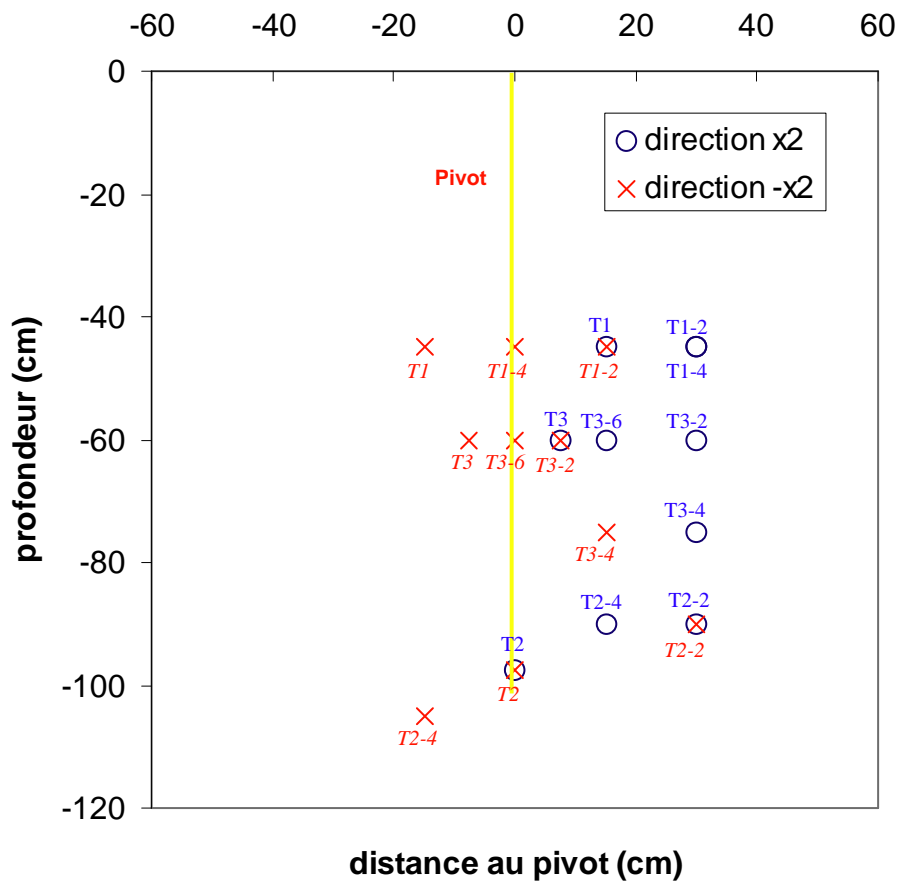
Tableau 1 : données géométriques des systèmes racinaires.

Type	Axes	Diamètre (cm)	Longueur (cm)	Ang p/r horiz (°)
T1	pivot	10	100	90
	A1 et A2	10	150	0
	A3 et A4	10	75	0
T2	pivot	10	100	90
	A1 et A2	10	150	45
	A3 et A4	10	75	45
T3	pivot	10	100	90
	A1 et A2	10	150	45
	A3 et A4	10	150	0
	A5 et A6	10	75	45

Tableau 2 : données pour les simulations

Maillage	
Taille éléments sol (cm)	30
Taille éléments racines (cm)	15
Paramètres sol	
E (MPa)	10
Coef. Poisson	0,3
Cohésion (MPa)	2000
Friction (°)	0
Paramètres racines	
E (MPa)	1000
Coef. Poisson	0,3
MOR tension/compression (MPa)	35/35
Chargement	
Direction de traction	x2 et -x2
Hauteur de traction (cm)	800
Déplacement imposé (cm)	150

Figure 2 : position des axes de rotation par rapport au pivot. Ils ont été estimés visuellement à partir des cartographies de déformations plastiques.



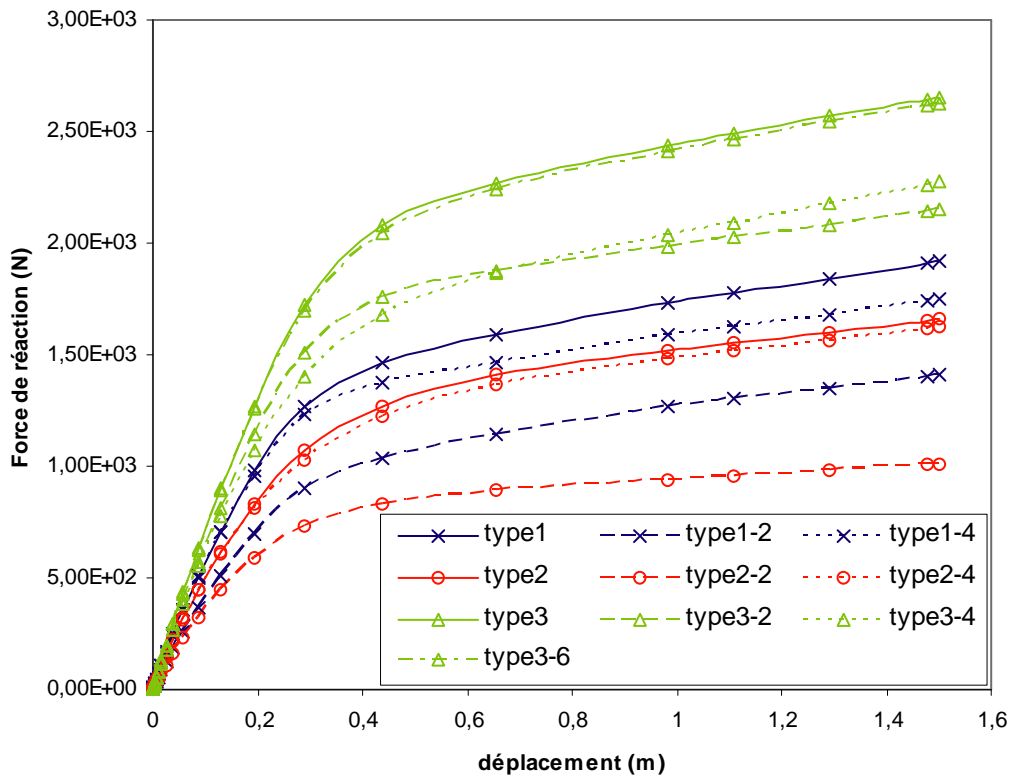


Figure 3 : courbes de réponse déplacement/réaction pour les essais de traction dans la direction x_2 .

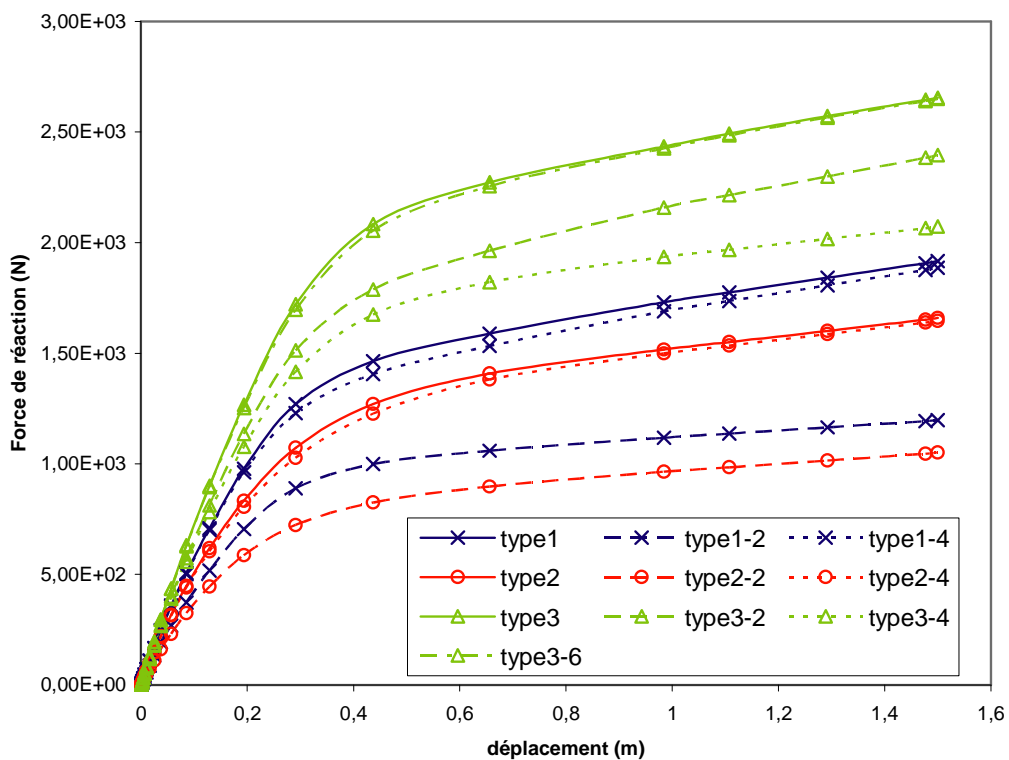


Figure 4 : courbes de réponse déplacement/réaction pour les essais de traction dans la direction $-x_2$.

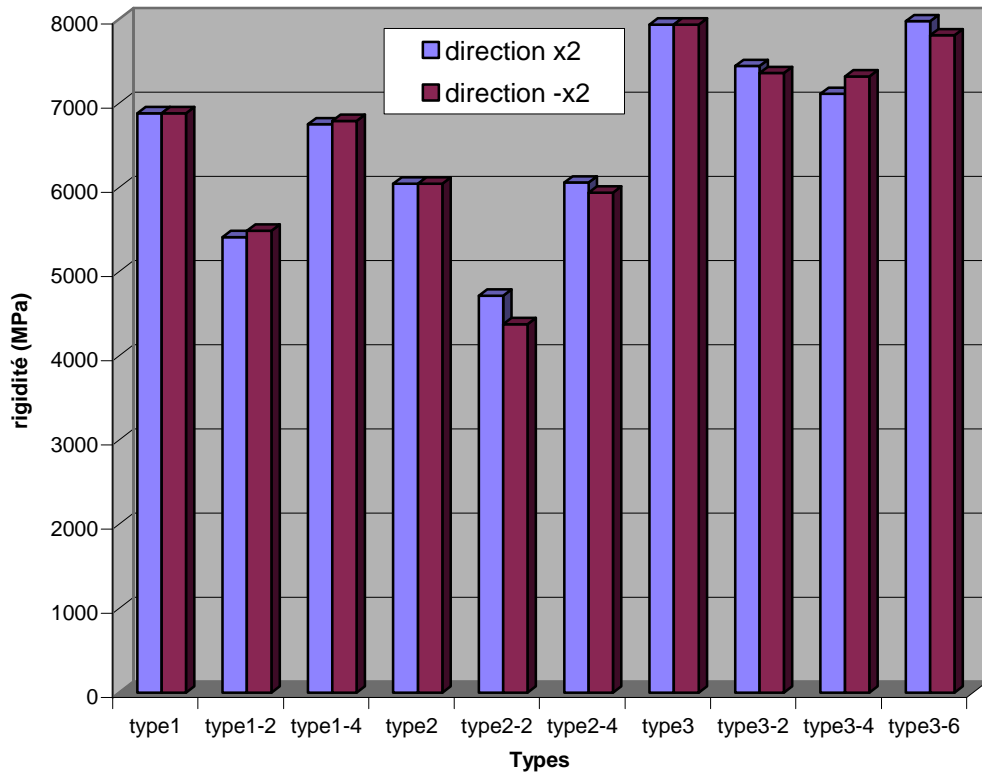


Figure 5 : rigidités calculées pour tous les types dans les directions x2 et -x2.

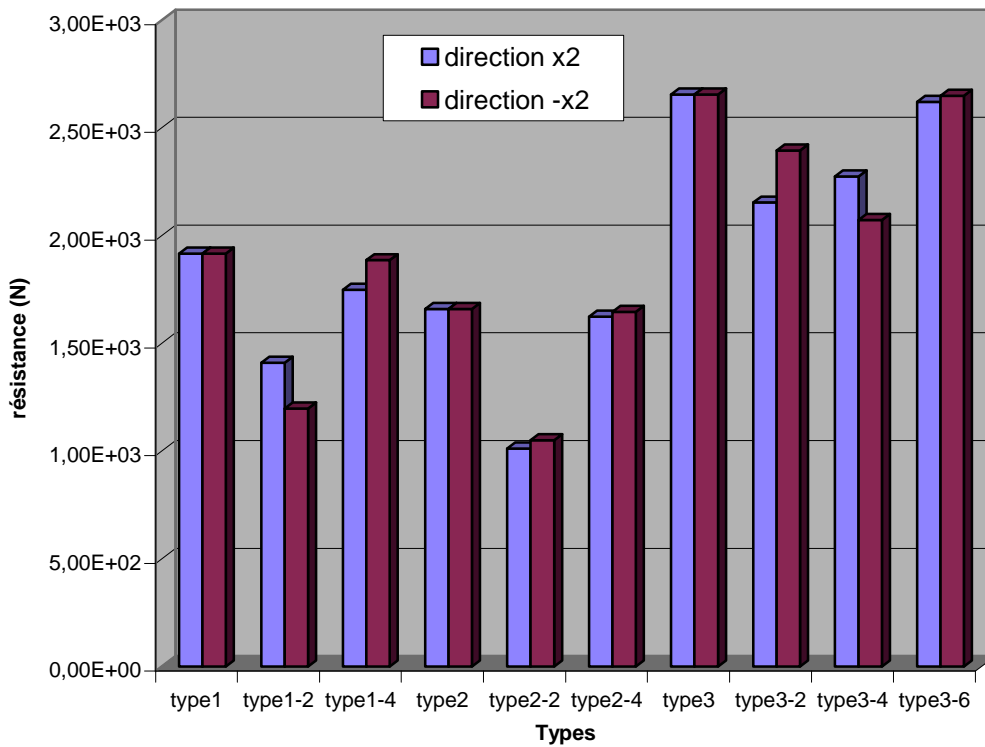


Figure 6 : résistances calculées pour tous les types dans les directions x2 et -x2.

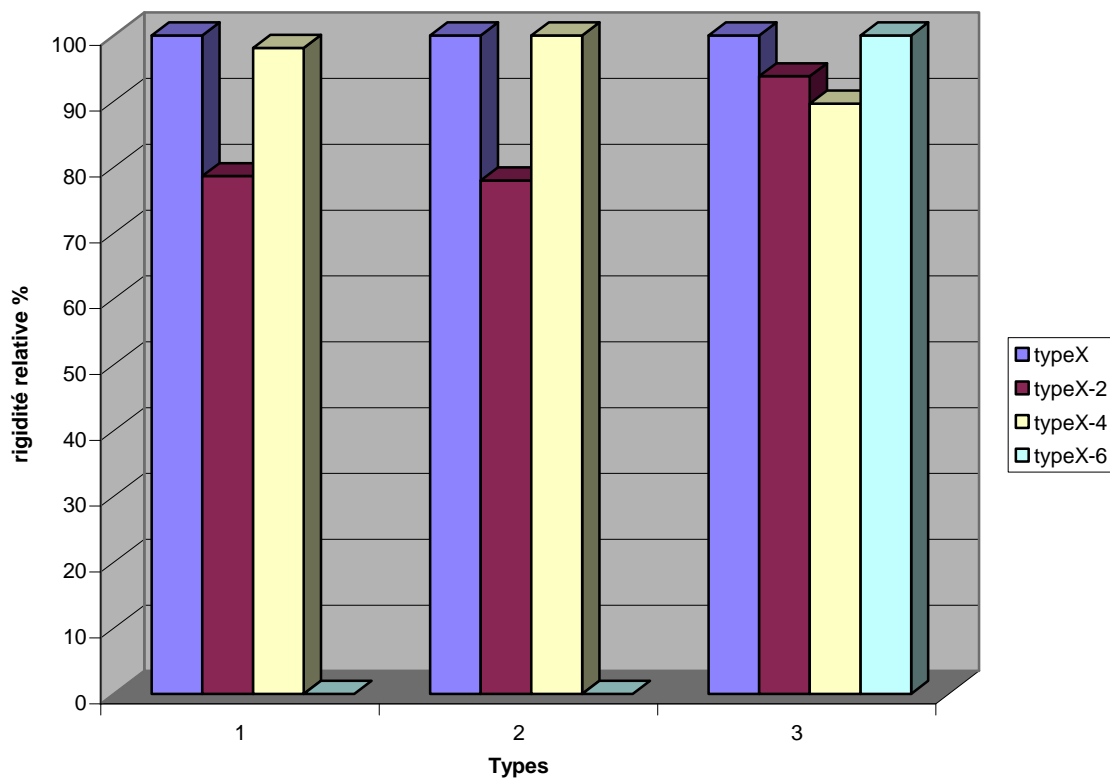


Figure 7 : rigidités relatives pour les essais de traction dans la direction x2.

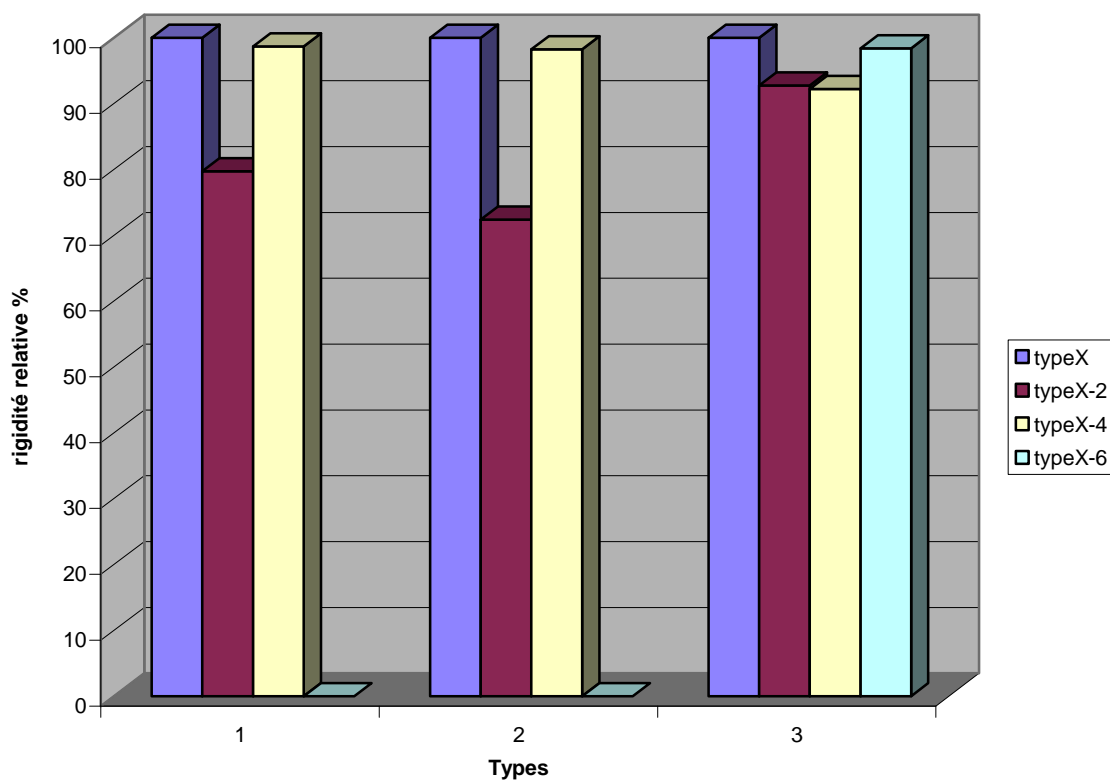


Figure 8 : rigidités relatives pour les essais de traction dans la direction -x2.

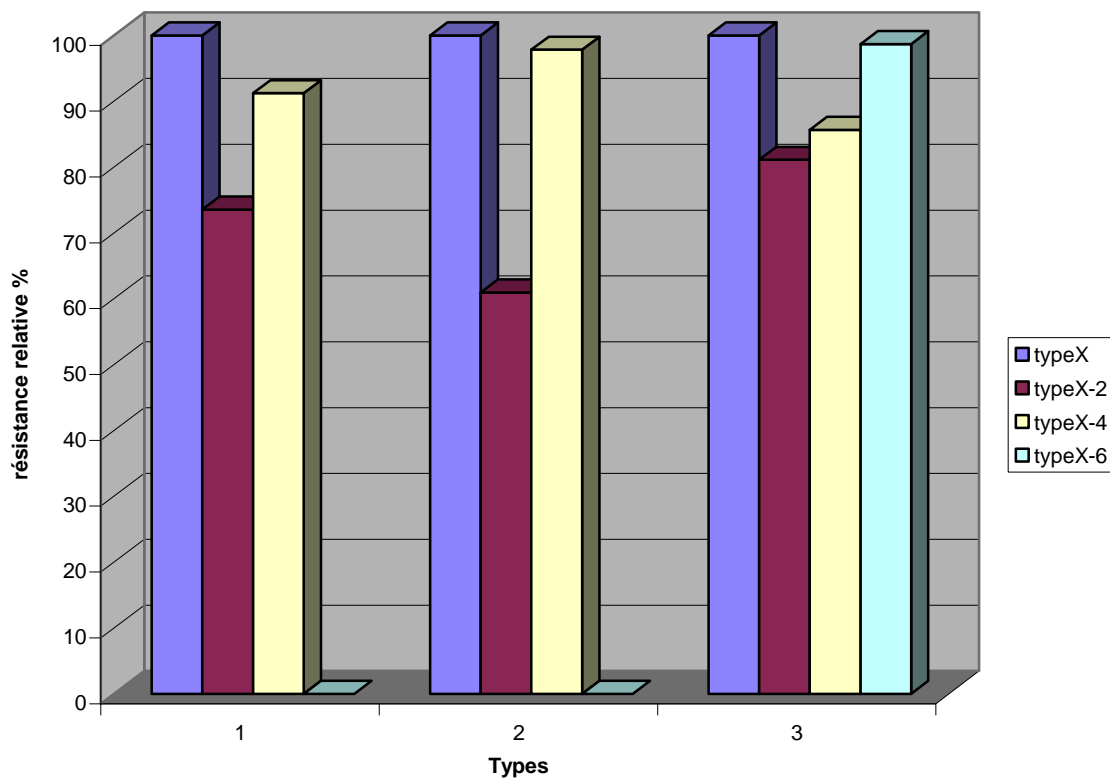


Figure 9 : résistances relatives pour les essais de traction dans la direction x2.

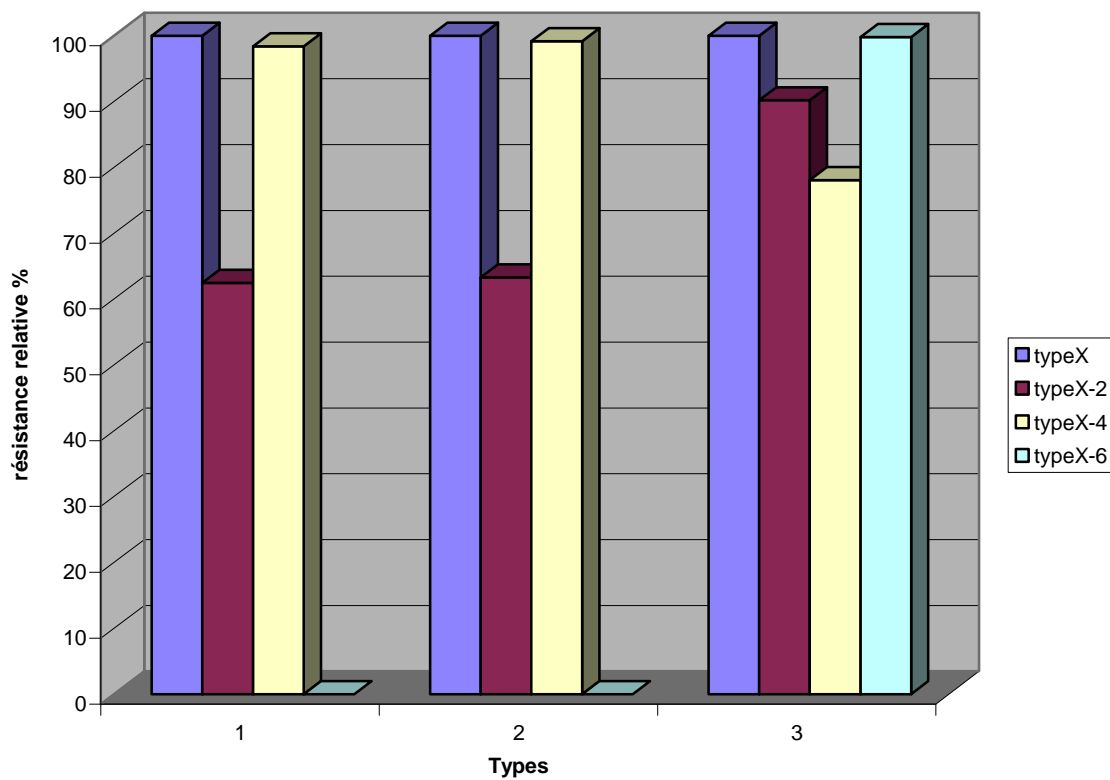
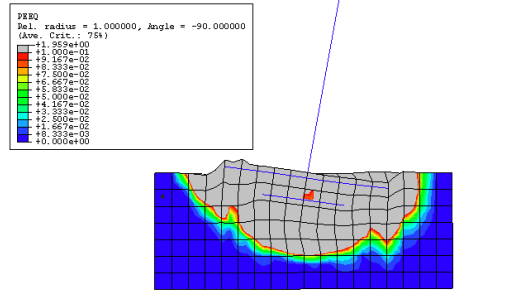
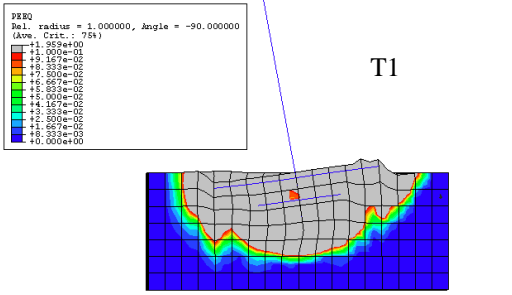
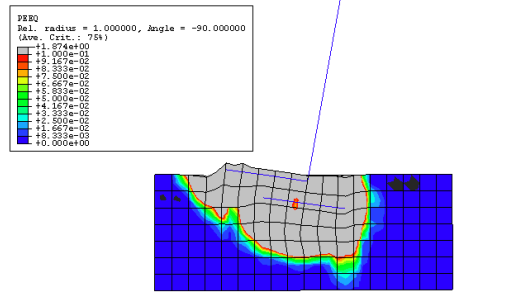
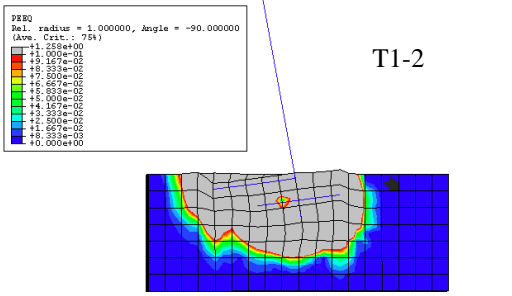


Figure 10 : résistances relatives pour les essais de traction dans la direction -x2.



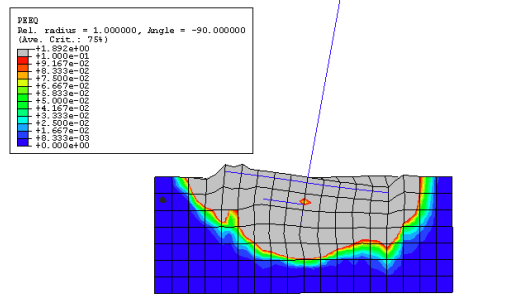
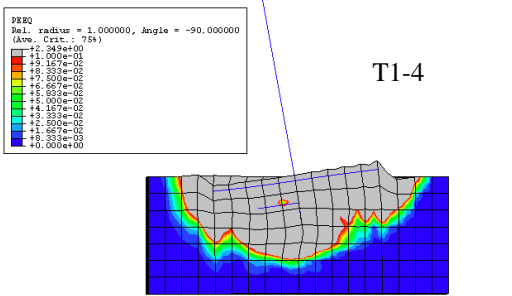
3
2
Ancrage racine avec sol
ODB: type1.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Sun Jun 20 19:13:42 Paris, Madrid 2004
Step: Step-2, Step3
Increment 19 Step Time = 1.000
Primary Var: PERQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

3
2
Ancrage racine avec sol
ODB: type1.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Fri Jul 30 11:23:35 Paris, Madrid 2004
Step: Step-2, Step3
Increment 19 Step Time = 1.000
Primary Var: PERQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



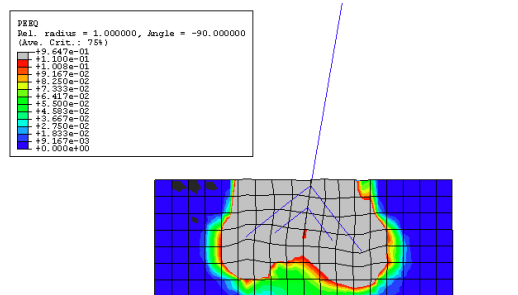
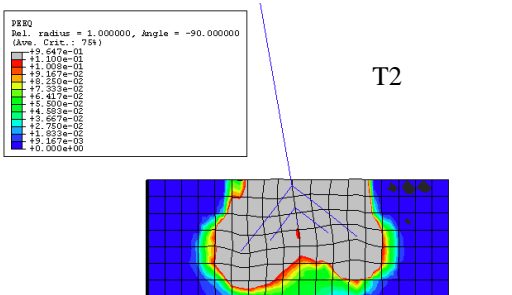
3
2
Ancrage racine avec sol
ODB: type1-2.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Sun Jun 20 19:02:34 Paris, Madrid 2004
Step: Step-2, Step3
Increment 19 Step Time = 1.000
Primary Var: PERQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

3
2
Ancrage racine avec sol
ODB: type1-2.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Fri Jul 30 11:35:20 Paris, Madrid 2004
Step: Step-2, Step3
Increment 19 Step Time = 1.000
Primary Var: PERQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



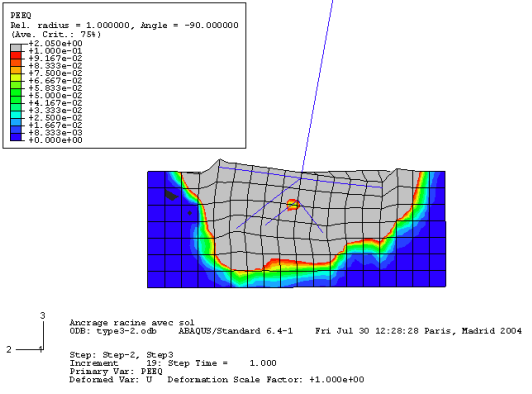
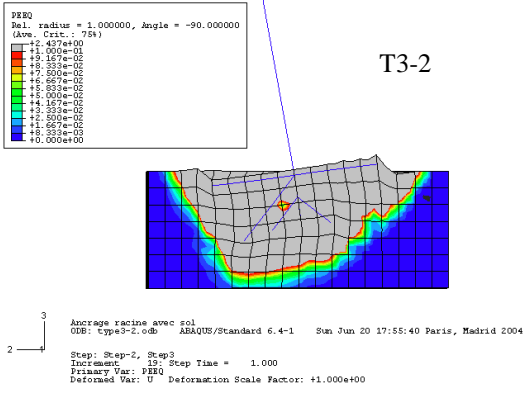
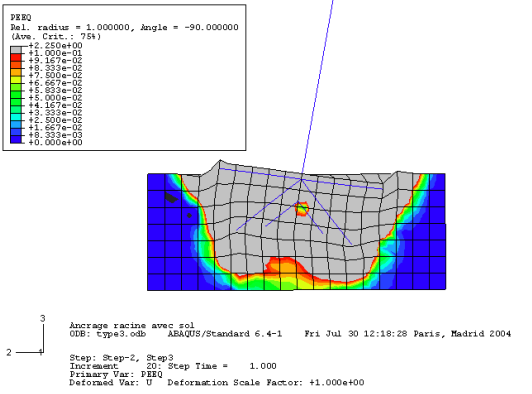
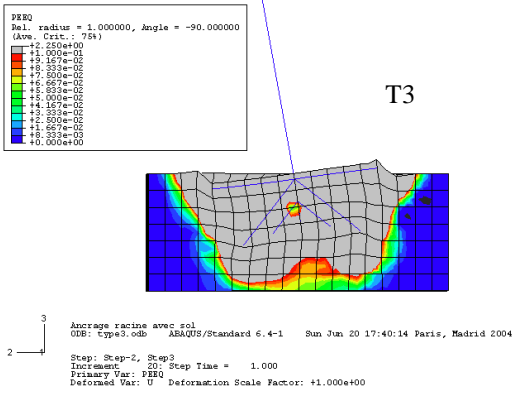
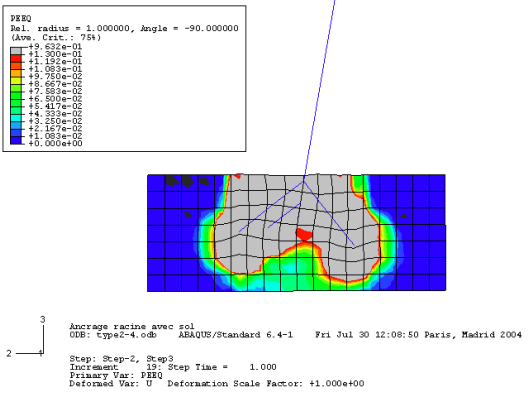
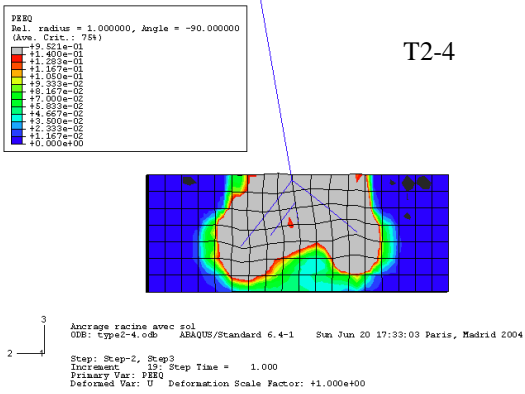
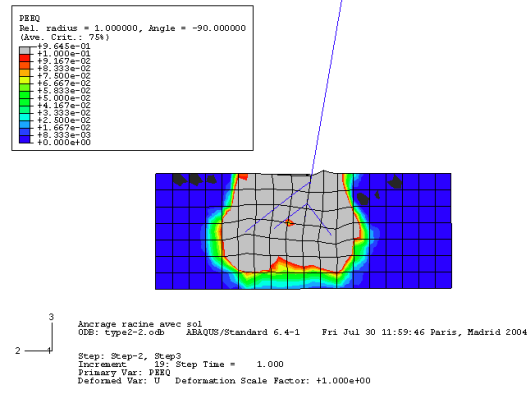
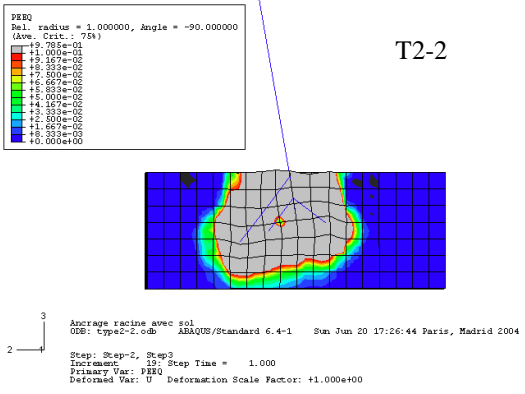
3
2
Ancrage racine avec sol
ODB: type1-4.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Sun Jun 20 17:09:27 Paris, Madrid 2004
Step: Step-2, Step3
Increment 19 Step Time = 1.000
Primary Var: PERQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

3
2
Ancrage racine avec sol
ODB: type1-4.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Fri Jul 30 11:44:08 Paris, Madrid 2004
Step: Step-2, Step3
Increment 19 Step Time = 1.000
Primary Var: PERQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



3
2
Ancrage racine avec sol
ODB: type2.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Sun Jun 20 17:18:36 Paris, Madrid 2004
Step: Step-2, Step2
Increment 19 Step Time = 1.000
Primary Var: PERQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

3
2
Ancrage racine avec sol
ODB: type2.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Fri Jul 30 11:52:27 Paris, Madrid 2004
Step: Step-2, Step3
Increment 19 Step Time = 1.000
Primary Var: PERQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



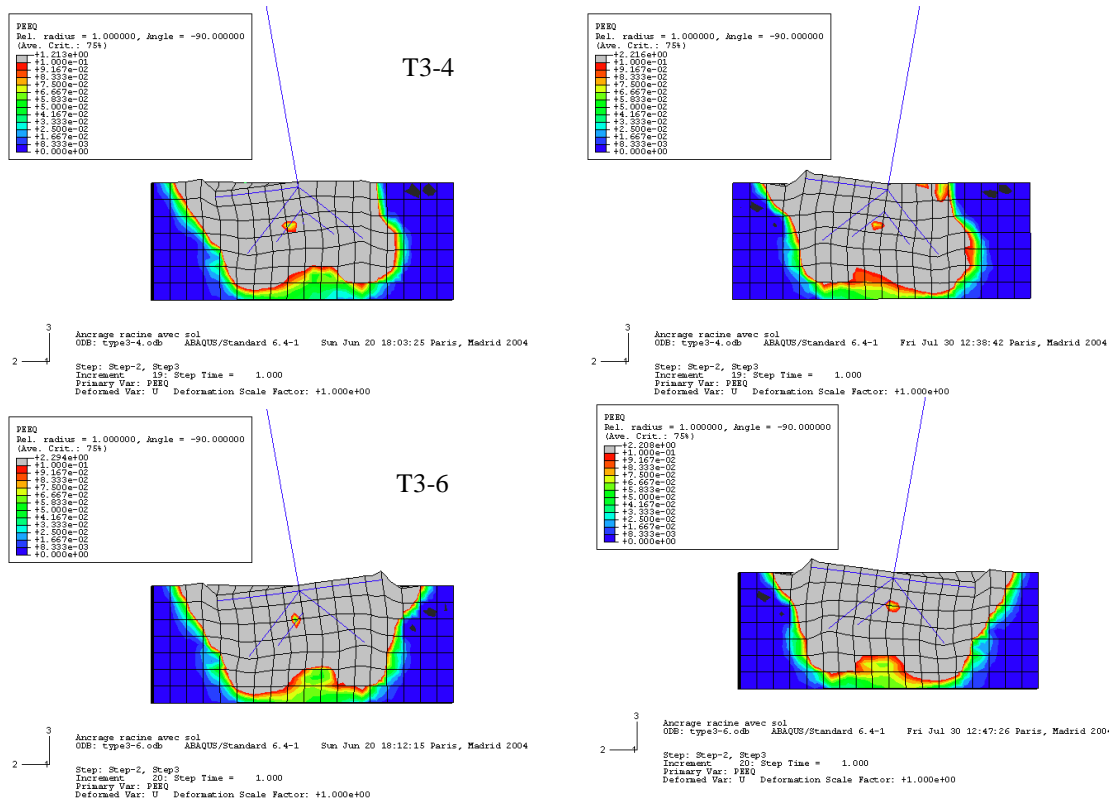


Figure 11 : champ de déformations plastiques pour tous les systèmes analysés. Les valeurs sont plafonnées de façon à voir apparaître une zone non déformée permettant de localiser l'axe de rotation. La colonne de gauche représente les résultats pour les essais de traction dans la direction x2, la colonne de droite pour les essais dans la direction opposée -x2.