

Mémoire de stage

présenté par

Rosmery A. ROBLES LEON

pour obtenir le diplôme

d'Ingénieur forestier

20^e promotion

Sujet :

**La fertilisation du sol modifie-t-elle la croissance radiale
des arbres en conditions de sécheresse ?**

soutenu publiquement le mardi 15 octobre 2013

à AgroParisTech,

Centre de Montpellier

devant le jury suivant :

Georges Smektala	Président du jury
Dr. Stéphane PONTON	Maître de stage
Dr. Nathalie BREDA	Maître de stage
Dr. Vincent FREYCON	Rapporteur
Dr. Raphaël MANLAY	Tuteur AgroParisTech

Page de garde : Rosmery A. Robles León

Mémoire de stage

présenté par
Rosmery A. ROBLES LEON

pour obtenir le diplôme
d'Ingénieur forestier
20^e promotion

Sujet :

**La fertilisation du sol modifie-t-elle la croissance radiale
des arbres en conditions de sécheresse ?**

soutenu publiquement le mardi 15 octobre 2013

à AgroParisTech,
Centre de Montpellier

devant le jury suivant :

Georges Smektala	Président du jury
Dr. Stéphane PONTON	Maître de stage
Dr. Nathalie BREDA	Maître de stage
Dr. Vincent FREYCON	Rapporteur
Dr. Raphaël MANLAY	Tuteur AgroParisTech

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE DE LA FIF

Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-ENGREF	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : La fertilisation du sol modifie-t-elle la croissance radiale des arbres en conditions de sécheresse	Mots clés : fertilisation, amendement, sécheresse, dendrochronologie, déficit hydrique, croissance radiale
AUTEUR(S) : Rosmery A. Robles León	Promotion : 20 ^e
Caractéristiques: 1 volume ; 33 pages ; 9 tableau ; 5 figures ; 16 annexes ; bibliographie.	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Unité mixte de recherche d'Ecologie et écophysiolgie forestier (UMR EEf)					
Nom du responsable :	Stéphane Ponton	et Nathalie Bréda			
Fonction :	Chargé de Recherche	Directrice de Recherche			
Nom du responsable ENGREF (pour un stage long) : Raphaël Manlay					
Tronc commun	<input type="checkbox"/>	Stage en entreprise	<input type="checkbox"/>	Autre	<input type="checkbox"/>
Option	<input type="checkbox"/>	Stage à l'étranger	<input type="checkbox"/>		
D. d'approfondissement	<input checked="" type="checkbox"/>	Stage fin d'études	<input checked="" type="checkbox"/>		
Date de remise :					

SUITE A DONNER (réservé au service des études)

- Consultable et diffusable
- Confidentiel de façon permanente
- Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes tuteurs de stage, Stéphane Ponton et Nathalie Bréda qui ont accepté de m'accueillir au laboratoire d'Ecologie et Ecophysiologie Forestier (EEF). A Stéphane pour m'avoir dirigé dès au début à la fin du stage, pour sa patience et rigueur pendant la période de l'analyse et la discussion de résultats. A Nathalie pour son aide pendant la période de préparation des données du climat et du sol pour lancer Biljou© ; et pour ses conseils et rigueur à me faire comprendre le chemin de l'étude. Enfin, je vous remercie tous les deux pour sa patience pendant la correction de mon mémoire de stage.

Je remercie chaudement Yves Lefèvre, chercheur en mission à l'UMR EEF, pour son appui constant à la recherche d'information sur la description du sol. Merci d'avoir pris le temps de me faire comprendre et partager votre connaissance sur les caractéristiques et classification du sol. Je remercie également Claude Nys et Arnaud Legout, chercheurs de l'UMR BEF, pour partager ses informations sur la description du sol des différents sites d'étude.

Ce projet a bénéficié également du soutien du Laboratoire d'Excellence ARBRE (ANR-12-LABEXARBRE-01).

Je tiens à remercier Jean-Luc Dupouey, chercheur de l'UMR EEF, pour ses conseils sur la méthode d'analyse. Merci pour intervenir et partager ses connaissances.

Je remercie Raphaël Manlay, mon tuteur AgroParisTech, pour sa disponibilité et l'organisation de la soutenance de stage du début à la fin.

Merci aux chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'UMR EEF avec qui j'ai échangé soit sur des problématiques du stage soit sur d'autres sujets de recherche : Sandrine Chauchard, Vincent Badeau, Christophe Rose et Pierre Montpied.

Je remercie de manière spéciale François Geremia pour ses conseils sur la base de données dendrochronologiques. Je remercie François et Patrick, techniciens du laboratoire EEF pour leur bonne humeur et son amitié. Merci François et Patrick!

Je remercie Lucy et Daphne, stagiaires du laboratoire EEF, pour les bons moments passés. Enfin, je remercie Pauline Pinto pour ses conseils et sa chaleur d'amitié, il a été très bien d'y en discuter avec toi, surtout en espagnol.

RESUME

Les études sur la relation entre fertilisation/amendement, la croissance et récemment le transfert d'eau dans l'arbre peuvent aider à comprendre la réponse de l'arbre face au stress hydrique induit pour le changement climatique. Dans ce sens, l'objectif du travail de stage est d'évaluer si la fertilisation/amendement modifie l'impact de la sécheresse sur la croissance radiale des arbres. Nous remobilisons 11 dispositifs expérimentaux anciens de l'INRA concernant cinq essences françaises, les chênes sessile et pédonculé, le hêtre, le sapin et l'épicéa. Nous avons récupéré les mesures de largeurs de cernes utilisées pour le calcul de l'indice de croissance, les données sur la description du sol (profondeur, couleur, texture, structure, caillouté et distribution de racines fines) et les données du climat (température, pluie, vent, rayonnement et humidité relative ou tension de vapeur) pour calculer, dater et comparer l'intensité des épisodes de sécheresse à partir du modèle de bilan hydrique. Enfin, nous utilisons le modèle à effet mixte pour analyser la croissance radiale en réponse au déficit hydrique à court et à moyen terme. Les résultats montrent que l'impact de la sécheresse sur la croissance radiale de cinq dispositifs peut être modulé par la fertilisation/amendement et varie selon le cadre de figure (type d'essence, de sol, de traitement...).

Mots clés : fertilisation, amendement, sécheresse, dendrochronologie, déficit hydrique, croissance radiale.

ABSTRACT

Studies on the relationship between fertilizer/amendment, the growth and recent the transfer of water in the tree can help to understand the response of the tree facing water stress leads to climate change. In this sense, the objective of the internship work is therefore to evaluate whether fertilization/amendment changes the impact of drought on radial growth of the trees. We work with 11 former experimental designs set up by INRA for five French species, sessile and pedunculate oaks, beech, silver firs and Norway spruce. We recovered ring widths measurements used to calculate a growth index, data describing the soil (depth, color, texture, structure, and distribution of mottled fine roots) and daily climate data (temperature, rain, wind, radiation and vapor pressure or relative humidity) to calculate date and compare the intensity of droughts with a water balance model. Finally, we use a mixed-effect model to analyze radial growth in response to water deficit in the short and medium term. The results show that the impact of drought on radial growth of five devices can be modulated by fertilization/amendment and according to the species and the soil conditions.

Keywords: fertilization, amendment, drought, dendrochronology, water deficit, radial growth.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	1
RESUME	3
ABSTRACT	3
TABLE DES MATIÈRES	5
1. INTRODUCTION	7
2. MATERIEL ET METHODES	13
2.1. Site d'étude	13
2.1.1. le site de Bercé.....	13
2.1.2. Les sites de Croix-scaille	13
2.1.3. Le site de Darney	14
2.1.4. Le site de Fougères	14
2.1.5. Les sites lorrains et alsaciens des Vosges	14
2.1.6. Le site des Hospices de Nancy	15
2.1.7. Les Potées	15
2.1.8. Stratégies d'échantillonnage.....	15
2.2. Acquisition des données	16
2.2.1. Données de départ.....	17
2.2.2. Données calculées.....	18
2.3. Analyse des données	22
2.3.1. Analyse de variance.....	22
2.3.2. Ajustement des données	23
2.3.3. Modèle à effets mixtes	23
3. RESULTATS	25
3.1. Croissance avant la fertilisation	25
3.1.1. Test des différences entre modalités.....	25
3.1.2. Ajustement des données	25
3.2. Evaluation de l'effet de la fertilisation	26
3.2.1. Evolution du gain de croissance.....	26
3.2.2. Indice de déficit hydrique	28

3.2.3. Analyse de variance après la fertilisation.....	29
3.3. Effet de la sécheresse sur la croissance radiale après la fertilisation	31
4. DISCUSSION	35
4.1. Evaluation de l'effet de la fertilisation	35
4.2. Evaluation de l'effet de la fertilisation sur la croissance radiale dans des conditions de sécheresse	35
4.2.1. Effet de l'azote sur la croissance radiale en conditions de déficit hydrique	36
4.2.2. Effet du calcium sur la croissance radiale en conditions de déficit hydrique.....	36
4.2.3. Effet de la fertilisation ou amendement sur la croissance de peuplements jeunes et adultes en conditions de déficit hydrique	37
4.3. Discussion de la méthode d'étude	38
4.3.1. Méthode de standardisation arbre par arbre.....	38
4.3.2. Méthode d'ajustement.....	38
5. CONCLUSION	41
6. REFERENCES.....	43
7. LISTE DES ABREVIATIONS.....	49
8. TABLE DES TABLEAUX	51
9. TABLE DES FIGURES	53
10. ANNEXES.....	55
TABLE DES ANNEXES	55

1. INTRODUCTION

Le changement climatique est sans doute un des phénomènes qui pourrait affecter de manière importante la structure, la composition et la biogéographie de la forêt dans les différentes régions du monde (Allen *et al.*, 2010). De nombreuses études ont mis en évidence la préoccupante relation entre la mortalité des arbres et le stress induit par le climat. La mortalité chez de nombreuses espèces ligneuses en Espagne (Martinez-Vilalta et Pinol, 2002; Pasho *et al.*, 2012) a augmenté dans les années 1990 et 2000. En France, une augmentation de la mortalité de chêne, sapin, épicéa, hêtre et pin a été enregistrée après l'extrême vague de chaleur et de sécheresse de l'été 2003 (Vennetier *et al.*, 2005; Bréda *et al.*, 2006; Landmann et Dreyer, 2006). En Suisse et en Italie, l'augmentation de la mortalité de *Pinus sylvestris* près de la limite sud de son aire de répartition a eu également lieu après la sécheresse de 2003 (Vertui et Tagliaferro, 1998; Bigler *et al.*, 2006; Dobbertin et Rigling, 2006). La grave sécheresse de 2000 a tué beaucoup d'individus des espèces *Abies halepensis* en Grèce continentale (Tsopelas *et al.*, 2004) et *Pinus halepensis* sub. *bruttia* (le plus tolérant à la sécheresse d'entre les pins de la Méditerranée) dans l'est de la Grèce (Körner *et al.*, 2005). La sécheresse estivale et les facteurs de stress biotiques ont induit la mortalité de *Quercus robur* en Pologne (Siwecki et Ufnalski, 1998), de *Picea abies* dans le sud-Norvège (Solberg, 2004) et la sévère mortalité de *Picea obovata* dans le nord-ouest de la Russie (Kauhanen *et al.*, 2008).

La mortalité de l'arbre est la dernière étape d'un processus de dépérissement qui peut être déclenché par une sécheresse extrême, qui se comporte alors comme un événement de sélection. Selon les scénarios de climats actuel et futur, ces événements pourraient affecter fortement les peuplements forestiers (Allen *et al.*, 2010) et notamment, les forêts présentes dans les sites xériques (e.g. les plantations de pin au sud de l'Espagne dont la durabilité est questionnée (Sánchez-Salguero *et al.*, 2012; Pasho *et al.*, 2011)). La mortalité des arbres est également associée à d'autres processus physiologiques et écologiques induits par le climat comme l'éclosion massive de pontes d'insectes ou les incendies (Bréda *et al.*, 2004; Bréda et Badeau, 2008). Bien que des problèmes de mortalité anormale se manifestent à chaque événement climatique extrême, les études de Allen *et al.* (2010) suggèrent que certains écosystèmes forestiers pourraient déjà être en train de répondre au changement climatique et que l'augmentation de la vulnérabilité des forêts semble concerner celles établies dans des environnements avec une bonne réserve en eau. Une augmentation des risques liés aux évolutions du climat pourrait affecter certains services écologiques qu'offre la forêt notamment le stockage de carbone.

En France, une vague de dépérissements forestiers a été mise en évidence au début des années quatre-vingt ce qui pourrait être lié aux années le plus sèches depuis 1952 (voir annexe 16 p. 81). L'altération de la santé des peuplements et l'augmentation de leur sensibilité aux agressions externes, extrêmes climatiques ou pollution ont été attribués aux insuffisances d'alimentation minérale ou à l'acidité excessive du sol (Bonneau, 1995; Landmann *et al.*, 1987). Dans ce contexte, des expériences de fertilisation (apport d'éléments nutritifs nécessaires à la vie des végétaux et qui seront prélevés par les racines comme les engrais contenant principalement azote, phosphore, potassium et magnésium) ou d'amendement (l'apport d'éléments nutritifs comme le calcium est plutôt destiné à améliorer les propriétés physico-chimiques du sol) ont été installées pour évaluer l'effet des nutriments sur la croissance des arbres (Bonneau, 1995). Les objectifs de la fertilisation ou de l'amendement des sols forestiers ont évolué au cours du temps. Lors des premières expériences, on cherchait à accroître la production (Le Tacon, 1969) principalement la croissance juvénile (pour parvenir au plus tôt au stade de la sélection) et améliorer la qualité et quantité des fruits (Garbaye et Leroy, 1974). A cette première préoccupation s'ajoutait la nécessité de reconstituer et conférer une productivité accrue à la forêt qui avait été dégradée (par la surexploitation du bois) ou réduite en surface à travers le temps (dû à l'expansion de l'agriculture, construction des villages, etc.). Parallèlement, dans les années 80, la demande de bois augmente et ne cesse d'augmenter à l'heure actuelle. En réponse à cette demande, en France (comme dans d'autres pays européens), de vastes étendues de terres incultes ou dégradées ont été valorisées par la plantation de conifères depuis le dernier siècle (Becker, 1992; Jonard *et al.*, 2010; Picard *et al.*, 1999). Ces terres concernaient des sols très pauvres, raison pour laquelle il y a eu un intérêt

croissant pour l'apport au sol d'éléments nutritifs, en qualité et en quantité, pour que le peuplement forestier puisse manifester tout son potentiel de croissance (Fehlen et Picard, 1994). Dans ce contexte, de nombreux essais de fertilisation ont été mis en place sur des peuplements juvéniles (Pin maritime dans les Landes (Gelpe et Lefrou, 1986), Epicéa dans le Massif Central (Bonneau, 1972), Sapin de Céphalonie dans le Midi (Guitton *et al.*, 1988) et autres) et adultes. Ces dernières expériences sur peuplements adultes ont été réalisées pour compenser les pertes (par lessivage) d'éléments apportés lors de la plantation (Le Tacon, 1970). Les expériences sur peuplements adultes (*e.g.* dispositif sur plantation d'épicéa sur sols ardennais installé par C. Nys en 1980-1981), laissaient en effet augurer qu'un apport d'éléments approprié permettrait d'augmenter la croissance d'arbres adultes et d'obtenir ainsi un raccourcissement de révolution de 10 à 15 ans. Cependant, l'application d'azote avait montré un effet dépressif sur la production d'épicéa tandis que l'apport de calcium avait entraîné une augmentation de la croissance. Sur la même expérience, des symptômes de dépérissement (jaunissement et perte d'aiguilles) sont apparus (en 1986) et semblaient liés aux types d'apport que les arbres avaient reçus. Ainsi, les arbres ayant bénéficiés d'un apport de calcium restèrent sains tandis que les arbres témoins et ceux ayant été fertilisés à l'ammonitrate dépérirent (Fehlen, 1992). Ainsi, au-delà de la volonté d'augmenter la production forestière, un nouvel objectif de restauration de la santé des forêts a déterminé l'apport d'éléments nutritifs sur les peuplements forestiers (Bonneau, 1995).

En conséquence, les processus liés à la mortalité et à la récupération de la productivité de la forêt sont de plus en plus souvent analysés (Bréda et Badeau, 2008). Ainsi, de nombreuses études dendrochronologiques ont été entreprises sur plusieurs peuplements forestiers fertilisés et amendés montrant des relations entre la disponibilité des nutriments, la croissance radiale et plus récemment le stress hydrique. Ainsi, sur des peuplements de chêne sessile (*Quercus petraea*) établis sur sols pauvres et acides, la croissance radiale augmente de manière significative et permanente après la fourniture en nutriments minéraux (Becker *et al.*, 1996; Bakker *et al.*, 1999), alors que sur des peuplements d'épicéa (*Picea abies* (L.)) et de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb)), l'apport de nutriments semble moins favorable à la croissance (Bréda *et al.*, 2004). D'autres études (*e.g.* Goldstein *et al.*, 2013) montrent que une augmentation de la disponibilité d'azote et de phosphore dans le sol, entraîne une augmentation de la conductivité spécifique de l'eau (Amponsah *et al.*, 2004; Bucci *et al.*, 2006; Lovelock *et al.*, 2004; Lovelock *et al.*, 2006), de la croissance radiale et de la surface foliaire (Aber *et al.*, 1989; Bucci *et al.*, 2006; Phillips *et al.*, 2001). Les conséquences sont une augmentation de l'évapotranspiration et du diminution du potentiel hydrique vers des valeurs plus négatives (Bucci *et al.*, 2006; Samuelson *et al.*, 2008). Ainsi, les plantes fertilisées à l'azote et au phosphore fonctionnent vraisemblablement plus près du point de dysfonctionnement hydraulique (Tyree et Sperry, 1988). De plus, les études de Becker (1992), Fehlen (1992) et Marsalle, (1996) montrent, sans expliquer, que l'effet de l'azote est dépressif sur la croissance radiale du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.), de l'épicéa (*Picea abies* (L.)) et du hêtre (*Fagus sylvatica* L.), respectivement. A l'inverse, l'étude de Bakker (1998) montre que l'amendement calcique améliore la croissance de racines fines de chêne sessile (*Quercus petraea* (M.), en surface et en profondeur, favorise la minéralisation et l'absorption de nutriments et, augmente la croissance radiale. La durabilité des effets de la fertilisation sur la croissance radiale semble varier en fonction des situations (espèces, sols, sylviculture, ...). Ainsi, alors que certains études montrent que l'effet à court terme de la fertilisation sur la croissance en diamètre est positif et favorise le développement des arbres (Mandre *et al.*, 2006), d'autres études, réalisées à plus long terme, montrent que la croissance des peuplements fertilisés diminuent avec le temps (Jonard *et al.*, 2010; Van der Perre *et al.*, 2012; Becker *et al.*, 1996).

Les fonctions de la plante dans des conditions naturelles sont en relation avec les cycles de l'eau et des nutriments. Ces fonctions répondent à une gamme de valeurs des facteurs qui l'affectent. Cependant, si ces valeurs dépassent les limites permises la plante peut être gravement endommagée comme c'est le cas du dépérissement d'arbres induit par la sécheresse extrême. La Figure 1 (ci-dessous) montre le cycle des nutriments et de l'eau dans de conditions naturelles (cadre théorique) où l'apport de nutriments par la roche mère et le drainage, ruissellement et écoulement de l'eau ne sont pas représentés mais ils existent dans des conditions naturelles.

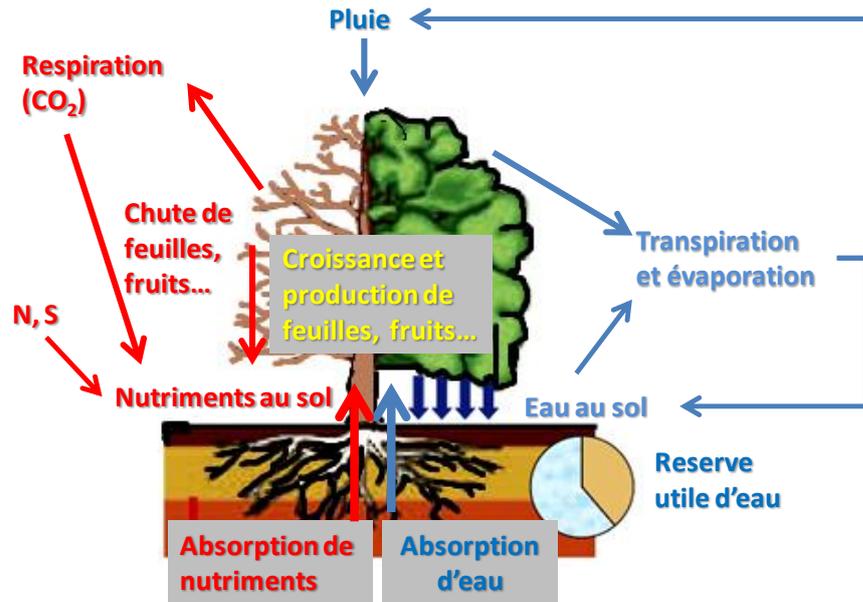


Figure 1 : Représentation des facteurs qui affectent les fonctions de l'arbre, tiré de Badeau *et* Bréda, 2008.

Dans ce sens, bien que les effets de la fertilisation ou l'amendement sur la fonction de croissance radiale de l'arbre soit mieux en mieux nombreux compris (au sens où l'étude concerne des relations avec autres fonctions de la plante comme la croissance de racines fines, l'allocation du carbone et autres), la relation entre fertilisation, croissance et sécheresse n'est pas bien connue. Cependant, d'après des observations sur le terrain au cours de certaines études (Barbaroux, 1997; Becker, 1992; Fehlen et Picard, 1994), il semblait que la fertilisation pouvait améliorer les conditions de croissance de l'arbre dans des conditions de sécheresse (arbres fertilisés/amendés plus vigoureux) par rapport aux arbres non fertilisés ou amendés après des événements de sécheresse. Une autre étude en Pennsylvanie, réalisée par Demchik et Sharpe (2000) sur le chêne rouge (*Quercus rubra* L.), suggère que la déficience de nutriments et la toxicité due à l'aluminium augmente la mortalité et réduit la croissance dans des conditions de sécheresse. Cependant, l'effet positif ou négatif de la fertilisation/amendement sur la croissance radiale pourrait être limitée à certains cas de figure car selon l'étude de Lebourgeois (1995) sur le Pin laricio de Corse (*Pinus nigra* Arnold ssp. *Laricio*). L'effet positif de la fertilisation phosphatée sur la croissance radiale diminue si l'approvisionnement en eau devient limitant. Les effets à court et à long terme de l'effet de la fertilisation sur la croissance dans des conditions de sécheresse sont actuellement inconnus.

Notre étude essaye donc de répondre à la question : Est-ce que la fertilisation du sol modifie la croissance radiale dans des conditions de sécheresse ? Les hypothèses à tester sont : (i) l'effet de la fertilisation améliore la croissance quand il y a déficit hydrique et (ii) l'effet de la fertilisation sur la croissance radiale en fonction de l'alimentation en eau varie au cours du temps selon l'espèce. Ainsi, l'objectif de l'étude est de comparer l'effet des différents types de fertilisation ou amendement du sol sur la croissance radiale de quatre essences forestières françaises en fonction de l'alimentation hydrique. Nous remobilisons des essais de fertilisation mis en place depuis plusieurs années par l'INRA dans divers massifs forestiers :

- Forêt Domaniale de Darney où des essais ont été installés pour étudier l'amélioration de la production et de la qualité du bois à long terme (Barbaroux, 1997).
- Forêt des Hospices de Nancy : installé dans des sapinières croissant sur des sols pauvres, avait pour objectifs d'améliorer la production d'arbres et d'étudier l'interaction entre l'eau et la compétition spécifique) (Le Tacon, 1970; Becker, 1992).
- Forêt Domaniale de Bercé, où plusieurs dispositifs ont été mis en place pour améliorer la croissance des arbres sur des sols limités en nutriments (Garbaye *et al.*, 1974)
- Quatre dispositifs installés conjointement dans les Vosges en Forêt Communale de Grendelbruch et Russ et en Forêt Domaniale de Mortagne et Vologne pour étudier la

relation entre la carence en nutriments et l'intensité du dépérissement des sapins) (Bonneau *et al.*, 1992; Lebourgeois *et al.*, 1993).

- Forêt Domaniale des Potées avec des essais installés plus récemment pour étudier l'effet de la fertilisation du sol sur la croissance de chêne pédonculé (Genet, 2009).
- Forêt Domaniale de Croix-Scaille qui a été installée pour améliorer la croissance d'arbres dans des sols pauvres (Fehlen et Picard, 1994; Le Tacon, 1970; Nys, 1987).
- Forêt Domaniale de Fougères installée pour évaluer les modifications du fonctionnement du sol et la dynamique de la croissance d'arbres à long terme (Le Tacon et Oswald, 1977; Marsalle, 1996).

Ces sites ont été choisis pour l'étude afin de bénéficier de la référence dendrochronologique déjà disponible. Ils comprennent cinq essences principales de la forêt française dont deux résineux, le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) et l'épicéa (*Picea abies* (L.)), et trois feuillus, le chêne sessile (*Quercus petraea* (M.)), le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) et le hêtre (*Fagus sylvatica* L.). Tout d'abord, une recherche exhaustive (pour chaque site) sur des archives d'études précédentes a été faite afin de récupérer les données dendrochronologiques (pour le calcul d'indices de croissance) et des informations sur la description du profil du sol, de la phénologie du peuplement et des données du climat (pour le calcul de l'indice de sécheresse). A partir des données climatiques, les paramètres du sol et du peuplement, les variations journalières de la réserve en eau du sol ont été simulés en ligne par le modèle Biljou© (<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>). Le modèle permet à la fois des simulations pluriannuelles rapides sur des séries climatologiques longues et une bonne précision sur l'évaluation de l'évapotranspiration réel (ETR) et des indices de sécheresse (Granier *et al.*, 1999). Enfin, nous avons analysé l'impact de la fertilisation sur la croissance radiale en fonction de l'intensité du déficit hydrique.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. SITE D'ETUDE

L'étude a été portée sur onze dispositifs expérimentaux de fertilisation/amendement déjà étudiés par différents auteurs et ayant fait l'objet d'une étude de croissance par dendrochronologie. Ces sites sont situés sur une forêt privée (Les Hospices de Nancy), deux forêts communales (la forêt communale de Russ et Grendelbruch) et huit forêts domaniales françaises : la forêt domaniale de Bercé, de Croix-Scaille, des Potées, de Darney, de Fougères, de Vologne et de Mortagne. Tous gérés par l'ONF. Ces sites concernent cinq essences forestières deux résineux (le sapin pectiné et l'épicéa) et trois feuillus (le hêtre, le chêne pédonculé et le chêne sessile). Ils sont situés dans des forêts surtout matures (traités en futaie) ou de plantation, d'âge moyen (à la date de carottage) dépassant les 50 ans sauf pour le dispositif de Potées (23 ans). Au total, les sites comprennent 182 placettes souvent organisées en blocs constitués en prenant en compte la variabilité spatiale du sol (voir annexe 1 p.55).

2.1.1. LE SITE DE BERCE

Le site de Bercé (47° 48' 23.19" N, 0° 23' 17.63" E. Alt. 153 m) a été installé en 1969 en parcelle n° 133 et 134 de la forêt domaniale de Bercé, section Route de Trembles (département de Sarthe). La température moyenne annuelle est de 11.2°C et la précipitation annuelle est 813 mm (ONF ; Températures et précipitations moyennes annuelles sur la période 1995-2004). Le site se trouve sur un peuplement de chêne sessile (âge moyen de 36 ans au début de l'expérience) (Garbaye *et al.*, 1974) et sur un sol lessivé à pseudogley relativement pauvre en calcium (voir annexe 5 p. 68). Le site comprend neuf placettes (57.5 x 57.5 m mais les mesures ne concernent que sur la zone centrale 47.5 m de côté). Ces placettes ont été organisées sur trois blocs, dont chaque bloc comprend un jeu des trois traitements (Annexe-carte placettes). Les placettes sont séparées les unes des autres par des bandes d'isolement de 8 m ne recevant aucun traitement. Les traitements considérés dans l'étude sont : témoin, NCa et NPKCaMg. Les engrais ont été appliqués à la volée entre 1970 et 1971 (pour N) et aux doses calculées à l'hectare comme montre le tableau 1. N a été apporté au printemps tandis que Ca, P, K et Mg ont été appliqués au-delà de la saison de végétation.

2.1.2. LES SITES DE CROIX-SCAILLE

Ce site (49° 53' 01" N, 04° 49' 20" E. Alt. 480 m) comprend deux dispositifs localisés en parcelle n° 32 dans la forêt domaniale de Château-Regnault (département des Ardennes). Le premier se situe sur un plateau près de la frontière belge. Les précipitations moyennes annuelles varient entre 1100 (Ranger *et al.*, 1981 ; basée sur une moyenne sur 30 ans de la station météorologique de Charleville-Mézières) et 1300 mm (Bakker, 1998 ; basée sur une décennie de mesures de la station météorologique des Vieux Moulins de Thilay, proche du site), et la température moyennes est de 8°C (Nys, 1987). Le site se trouve sur un peuplement mélangé où le chêne sessile (90 %) est majoritaire en volume par rapport au hêtre (10 %) et autres essences (le bouleau (*Betula pubescens*) et le sorbier (*Sorbus aucuparia*)). Le site se situe sur un sol brun acide (voir annexe 4 p. 67) avec des caractéristiques podzoliques et de stagnogley (Bakker, 1998). Le dispositif comprend huit placettes (15 x15 m) groupées dans deux blocs (chaque bloc comprend un jeu de quatre traitements). Ce dispositif est le seul qui ait été amendé et les traitements sont : T, CaMg, CaCO₃, CaSO₄. Les amendements calciques ont été appliqués manuellement en surface en 1990. Le deuxième dispositif a été installé en 1980 dans un peuplement issu d'une plantation de 1937 dans la Haute-Ardenne (parcelle n° 10, 6 e série). La moyenne annuelle des températures s'élève à 7.3°C (Picard *et al.*, 1999 ; station météorologique des Vieux moulins de Thilay, située à environ 3 km) et les précipitations annuelles sont de l'ordre de 1 100 mm, bien réparties dans l'année. La plantation est un peuplement adulte d'épicéa (âgés en moyenne de 40 ans en 1980) qui se développe sur un sol type ocreux (voir annexe 11 p.73). Ce peuplement a subi des actions sylvicoles comme l'éclaircie.

La première éclaircie a été entreprise très tardivement, en 1972. Les actions sylvicoles qui ont ensuite été menées ainsi que les catastrophes naturelles (en particulier les chablis de 1990 et l'attaque de Scolytes qui a suivi) ont diminué fortement les effectifs du peuplement (Fehlen et Picard, 1994). Vingt placettes (chacune de 50 m de côté), qui concernent quatre répétitions par traitement, ont été traitées mais seuls les arbres compris dans le carré central (30 m de côté) sont numérotés et ont été l'objet d'étude (voir annexe 2 p. 57). Les traitements sont : T, N, P, Ca et PCa. N a été épandu en plein au printemps 1981 et renouvelé en 1983. P et Ca ont été épandus en plein à l'automne 1980.

2.1.3. LE SITE DE DARNEY

Le site de Darney (48° 03' 02" N, 06° 04' 02" E. Alt. 400 m) a été installé en parcelle n° 453 et 454 en forêt domaniale de Darney en 1971-1972 (département des Vosges). Le climat est de type lorrain avec des précipitations annuelles de 950 mm, assez bien réparties au cours de l'année avec un léger maximum en juillet et août et un léger minimum pendant les trois premiers mois de l'année. La température moyenne de juillet est de 17°C et celle de janvier de 0.5°C (Kessler et Chambraud, 1990 ; précipitations et températures moyennes (sur la période 1950-1980) mesurés à la station météorologique de Vitel). Le site se situe sur une futaie adulte de hêtre (âgés de 110 ans en 1972) et sur sols brun acides (Barbaroux, 1997)(voir annexe 8 p. 71). Au sujet de la gestion sylvicole de la forêt de Darney, il apparaît que des coupes d'amélioration ont été effectuées pendant les hivers de 1948, 1956, 1977 et la coupe prévue en 1984 n'a pas été réalisée en raison de la tornade survenue le 11 juillet 1984. Les prélèvements effectués à cette date correspondent à la récolte des chablis (Barbaroux, 1997 ; information récupéré auprès de l'ONF, Epinal) (voir annexe 2 p. 57). Au total le site comprend 24 placettes organisées sur quatre blocs de six traitements. Les traitements sont : T, P, Ca, PCa et NPKCa1 et NPKCa2 avec deux doses différentes de calcium (Tableau 1). Le phosphore, le calcium et le potassium ont été apportés en surface au cours de l'hiver 1971-1972. Le site de Darney est le même qui a été utilisé par Barbaroux, 1997.

2.1.4. LE SITE DE FOUGERES

Le site (48° 23' 37" N, 1° 09' 49" O. Alt. 153 m) a été installé en 1972 en parcelle n° 75 et 77 de la forêt domaniale de Fougères (département d'Ille-et-Vilaine). Le climat est de type océanique tempéré avec une température moyenne annuelle qui varie entre 5 et 18°C et des précipitations annuelles de 900 mm assez bien réparties dans l'ensemble de l'année (Marsalle, 1996 ; précipitations et températures moyennes pour la station météorologique de Fougères pour la période 1966-1995). Le site est composé d'un peuplement de hêtre (95 %) d'âge moyen 82 ans en 1993. Des éclaircies régulières ont été effectuées les années 1974, 1970, 1976, 1977, 1984 et 1989. Le site a été installé sur un sol brun acide faiblement lessivé (Tillier, 1995) (voir annexe 7 p. 70). Ce site comprend cinq traitements répétés quatre fois (blocs), soit 20 placettes contiguës de 40 x 40 m (seule la zone centrale de 30 x 30 a été objet d'observations et mesures). Les traitements sont : T, N, P, Ca et NPKCa apporté entre avril et mai de 1943 (sauf pour l'azote apporté aussi en mai 1974). Le site de Fougères est le même que celui étudié par Marsalle, 1996.

2.1.5. LES SITES LORRAINS ET ALSACIENS DES VOSGES

Le site des Vosges comprend quatre dispositifs qui ont été installés dans le département des Vosges en 1985 sur deux forêts domaniales, Vologne (parcelles n° 42 et 44) et Mortagne (parcelles n° 2, 14 et 22) (sites lorrains), et sur deux forêts communales, Russ (parcelle n° 20) et Grendelbruch (parcelle n° 36 et 37) (sites Alsaciens). Il repose sur sols siliceux acides (voir annexe 10 p. 72) sur des peuplements de sapin âgés en moyenne de 94 ans en 1985 et des conditions écologiques variables à une altitude comprise entre 400 et 1000 m. Le climat vosgien est de type montagnard, les précipitations annuelles qui varient entre 800 et 1200 mm, la température moyenne annuelle entre 0 et 8°C (Lebourgeois, 1991). Au total, 40 placettes sont considérées (10 par site) et organisées sur deux blocs de cinq traitements (voir annexe 2 p. 57). Les traitements sont : Témoin, Ca, CaMg, KMg et NPKCaMg avec des doses et formes (Bonneau *et al.*, 1992)

détaillées dans le tableau 1. Le site des Vosges est le même que celui étudié par (Lebourgeois, 1991)

2.1.6. LE SITE DES HOSPICES DE NANCY

Le site (48° 09'N ; 7° 06' E. Alt. 800 m) a été installé sur la forêt privé des Hospices de Nancy (département de Meurthe-et-Moselle) en 1969. Il se trouve dans un peuplement de sapin d'âge moyen 107 ans à l'installation et sur des sols bruns-ocreux (voir annexe 9 p. 71). La température moyenne annuelle est de 7°C et la précipitation annuelle de 1 600 mm. Le site comprend 55 placettes circulaires de 14 m de rayon (seule la zone centrale de 9 m de rayon a été objet d'étude) à cinq répétitions de chaque traitement (sauf le control qui a 20 répétitions) (voir annexe 2 p. 57). Les traitements sont : Témoin, N, P, Ca, NP, NCa, PCa, NPCa. Le phosphore et calcium ont été apportés en automne de 1969, l'azote en printemps de 1970, les doses et formes sont détaillées dans le tableau 1.

2.1.7. LES POTEES

Le site (49° 51' 33" N, 04° 29' 34" E. Alt. 380 m) a été installé au nord de la France (parcelle n° 59) en forêt domaniale des Potées (département des Ardennes) en 1995. Il se situe dans une plantation monospécifique de chêne pédonculé de 12 ans en 1995 et sur sol brun acide (voir annexe 6 p. 69). L'organisation du dispositif consiste en deux répétitions d'un traitement et d'un témoin. Au total quatre placettes de 0.5 ha ont été installées. Les traitements sont : Témoin et CaMg. Les traites ont été appliquées en hiver de 1995, la dose est détaillée au tableau 1. Ce site est le même que celui étudié par Genet (2009).

2.1.8. STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGE

Au total, 3 458 arbres ont été échantillonnés (pour le prélèvement de carotte) sur tous les sites en utilisant deux stratégies d'échantillonnage, soit systématique pour les sites de Bercé et les Potées, soit en plain pour tous les autres sites. Dans le premier cas, les arbres dominants ont été sélectionnés en nombre qui varie selon le site. Dans le deuxième, tous les arbres de la placette (soit dominant, codominant, intermédiaire ou dominé) ont été étudiés (voir annexe 1 p. 55). Dans tous les sites une carotte par arbre a été prélevée (sauf pour le site de Fougères et des Hospices où 2 carottes par arbre ont été prélevées) avec une tarière dendrochronologique de Pressler de 5 mm de diamètre intérieur, orientée du sud vers le nord, sauf pour les arbres penchés dans un autre axe qu'est-ouest, ou présentant des défauts sur la face sud du tronc. Les cernes des carottes ont été mesurés au 1/100 mm, sur une chaîne de mesure informatisée (caméra numérique, chambre claire, table à digitaliser, ordinateur). L'interdatation des séries dendrochronologiques a été réalisée en utilisant le programme d'interdatation développé par Jean-Luc Dupouey (EEF).

Pour chaque site, nous avons fait une sélection d'arbres selon l'âge (élimination d'individus d'âge extrême) et nous avons gardé tous les arbres dont l'âge entrain dans l'intervalle de distribution 5-95 %. Les sites des Potées et Croix-Scaille-épicéa sont issus d'une plantation sans valeurs extrêmes à éliminer. Pour le site de Bercé, un arbre âgé de 85 ans (valeur extrême par rapport aux autres arbres du site) a été éliminé. Pour les sites de Darney, de Fougères, des Hospices et des Vosges, 10 % du total des arbres (soit 5 % les plus jeunes et 5 % les plus âgés) ont été supprimés. Au total, l'étude comprend 3 087 arbres sélectionnés à partir de l'échantillon initial et distribués sur 182 parcelles dont 133 placettes fertilisés/amendés (25.8 ha) et 49 placettes témoins (8.6 ha). Le Ca est le mieux représenté avec en moyen de 3 placettes par site et ensuite P, N, NPKCa, PCa et NPKCaMg dans l'ordre du plus au moins représentés. Enfin, NCa, NPCa, NP, KMg, CaSO₄ et CaCO₃ sont les moins représentés 1 ou 2 sites seulement.

Tableau 1 : Dose et forme d'apport des engrais de fertilisation ou amendement pour les parcelles traitées selon le site. Trait : Traitement.

Site	Trait	Dose (kg/ha ⁻¹)		Forme
Bercé	N _{Ca} , NPKCaMg	N	220	Ammonitrate
		P ₂ O ₅	200	Scories
		K ₂ O	120	Patentkali
		CaO	1500	Chaux éteinte
		MgO	34	Patentkali
Croix-Scaille (Chêne)	CaMg, CaCO ₃	CaO	1400	Carbonate de calcium
		MgO	1400	Patentkali
	CaSO ₄	CaO	1540	Sulfate de calcium
Croix-Scaille (Epicéa)	N	N	200	Ammonitrate
	P, PCa, Ca	P ₂ O ₅	150	Scories
		CaO	1400	Calcaire
Darney	P	P ₂ O ₅	240	Supertriple à 45 %
	PCa	P ₂ O ₅	240	Scories à 16 % de P ₂ O ₅
		CaO	675	
	Ca	CaO	1500	Carbonate ou chaux vive
	NPKCa1	N	200	Ammonitrate
		P ₂ O ₅	240	Scories à 16 %
		K ₂ O	150	Sulfate de potassium à 50 %
		CaO	675	Provenant des Scories
	NPKCa	N	200	Ammonitrate
		P ₂ O ₅	240	Scories à 16 %
K ₂ O		150	Sulfate de potassium à 50 %	
CaO		1500	Provenant des Scories et 50% de calcaire	
Fougère	N, P, Ca, NPKCa	N	100	Ammonitrate
		P ₂ O ₅	150	Supertriple
		CaO	1500	Carbonate de calcium
		K ₂ O	150	Sulfate de potassium
Vosges	Ca	CaO	1520	calcaire broyé et 26 % de chaux vive
	CaMg	CaO	1590	Récalcit magnésien
		MgO	450	
	KMg	K ₂ O	150	Kalimagnésia (Patentkali)
		MgO	50	
	NPKCaMg	N	200	Ammonitrate
P ₂ O ₅		200	Acide phosphorique	
K ₂ O		150	Clorure de potassium	
CaO		1590	Récalcit magnésien	
MgO		450		
Hospices	N, P, Ca, NP, N _{Ca} , PCa, NPCa	N	200	Ammonitrate
		P ₂ O ₅	150	Superphosphate triple
		CaO	1500	Chaux éteinte
Potées	CaMg	CaO	760	pas d'information
		MgO	200	

2.2. ACQUISITION DES DONNEES

2.2.1. DONNEES DE DEPART

2.2.1.1 Données dendrochronologiques

Nous partons d'un fichier de données, pour chaque site, où l'objet d'étude est la mesure des séries de cernes d'un échantillon d'arbres. Dans le cas de sites où deux carottes par arbre avaient été prélevées, il a été considéré dans la base de données finale la moyenne des cernes de ces deux carottes (Fougères et Hospices). Les données finales contiennent les informations suivantes :

- Nom du site d'étude
- Numéro d'arbre
- Numéro de cerne
- Type du traitement,
- Largeur du cerne (10^{-2} mm)
- Distance à la moelle (10^{-2} mm)
- Date de fertilisation/amendement
- Date de carottage
- Date ou âge du cerne.

Au total nous avons 250478 observations (soit 89 % de la base de données initiale) dont 48 % sont de hêtre, 36 % de sapin, 13 % d'épicéa et à moindre pourcentage (3 %) de chênes sessile et pédonculé (voir annexe 3 p. 66).

2.2.1.2 Données du sol

Les données sur la description du profil de sol ont été obtenues à partir d'études précédentes réalisées dans les mêmes sites ou des sites très proches de celui de notre étude. Pour les sites des Vosges, une visite in situ a été nécessaire pour corroborer l'information décrite dans l'étude de Lebourgeois, 1991, où il y avait une description du sol seulement pour les 20 premiers centimètres de la profondeur du sol (trop superficiel pour notre étude). Les données du profil du sol sont : le type de sol, la profondeur, la couleur, la texture, la structure, la proportion de cailloux et la proportion de racines par horizon du sol. Ces données sont détaillées en annexe 4 p. 67 jusqu'à 11 pour chaque site. L'information concernant la description du profil de sol a été utilisée pour le calcul des paramètres du sol (voir point 2.2.2.2).

2.2.1.3 Données du climat

Les données du climat sont journalières et elles ont été acquises pour chaque site d'étude à partir des stations météorologiques gérées par Météo-France les plus proches des sites d'étude. Ainsi, les périodes de chaque station sélectionnée se montrent en annexe 12 p. 75. Nous avons récupérées, au début de l'étude, des données du climat provenant des études précédentes, pour les sites de Bercé (données obtenus de la station Le Mans pour la période 1976-2009), Fougères (données obtenus de la station de Rennes-St. Jacques pour la période 1951-1997), Les Potées (données obtenus de deux stations Charleville-Mézières et Reims-Courcy pour la période 1993-2007), Russ et Grendelbruch (données obtenus de la station Entzheim pour la période 1950-1997) ; et pour les sites de Darney, Hospices, Mortagne et Vologne (données obtenus de la station Luxeuil pour la période 1956-1997). Pour le site de Croix-Scaille, nous avons acquis les données de la station Reims-Courcy (choisie par sa proximité au site d'étude et sa richesse de l'information en termes d'années de mesure et paramètres mesurés) pour la période 1950-1997. Dans les cas des sites de Fougères (il a manqué les données du vent) et Bercé (il a manqué les données pour la période 1949-1975), nous avons acheté les données du climat manquant aux stations Rennes-St Jacques et Le Mans, respectivement.

Les variables climatiques suivantes ont été traitées :

- Le cumul journalier des précipitations en mm (dans la Publithèque de Météo-France, ce paramètre correspond à « Hauteur de précipitations »).

- La moyenne journalière du rayonnement global incident exprimé en $J.cm^{-2}$ (dans la Publiothèque Météo-France, cette variable correspond à « Rayonnement global »). Pour certaines stations et pour les données anciennes (Le Mans, Entzheim et Luxeuil), le rayonnement n'était pas mesuré et nous avons acheté les données de durée d'insolation dans ce cas nous avons utilisé la formule d'Angström qui permet de convertir les durées d'insolation en rayonnement global.

- La température moyenne journalière de l'air exprimée en degrés Celsius. Elle peut être issue de mesures horaires ou semi-horaires, ou bien correspondre à la moyenne entre le minimum (TN) et le maximum (TX) de la journée. Les observations de TN et TX sont plus fréquentes ($(TN+TX)/2$ a donc été définie comme la valeur de référence) et permettent une très bonne estimation de la température journalière moyenne (INRA, 2009) (dans la Publiothèque Météo-France, TN et TX correspondent à « Température minimale sous abri » et « Température maximale sous abri »).

- La moyenne journalière de la vitesse du vent, exprimée en $m.s^{-1}$ (dans la Publiothèque Météo-France, il correspond à « Moyenne des vitesses du vent à 10 mètres »).

- La moyenne journalière de l'humidité de l'air, qui peut être caractérisée soit par l'humidité relative exprimé en % (dans la Publiothèque Météo-France correspond à « Humidité relative moyenne »), soit par la pression partielle de vapeur d'eau (dans Météo-France correspond à « Tension de vapeur moyenne »). Un seul de ces paramètres est requis pour les fichiers météo utilisés par Biljou©. Le choix dépend uniquement de la disponibilité ; en règle générale, l'humidité relative est plus fréquemment disponible. Les données du climat ont été organisées par site dans un fichier final météo requis en Biljou©.

2.2.2. DONNEES CALCULEES

2.2.2.1 Indice de croissance

La donnée utilisée pour le calcul de l'indice de croissance a été la largeur de cerne. En effet, la croissance radiale augmente d'abord avec l'âge puis elle diminue pour les individus très âgés. Cette relation est bien représentée dans la courbe largeur de cerne/âge avec une pente faible par rapport à la pente de la courbe surface de cerne/âge. Ainsi, nous avons considéré la largeur comme une variable plus pertinente que la surface pour le mettre en relation avec des données du climat car elle varie moins que la surface selon l'âge. De plus, le calcul de la surface du cerne est imprécis quand les carottes ne passent pas au cœur ou quand la section du tronc a une conformation qui s'écarte de la géométrie idéale. L'indice de croissance a été calculé en utilisant la méthode de standardisation arbre par arbre (Cook et Peters, 1997) qui permet de corriger chaque largeur de cerne d'un « bruit » indésirable et dégager le signal qu'on souhaite analyser. Le point de départ est une courbe de la largeur de cerne en fonction de la date. Sur cette chronologie individuelle, un ajustement est réalisé avec une « *cubic spline* » (Cook et Peters, 1981) (fonction « *ffcsaps* » du package *dplR* du logiciel R) préservant 50 % de la variance sur une période de 50 ans (voir annexe 13 p. 75). L'indice de croissance que nous avons utilisé est la différence entre les valeurs estimées par la courbe *cubic spline* et les valeurs mesurées de la largeur de cerne. Ainsi, la standardisation arbre par arbre ne conserve que le signal à haute fréquence, ce qui permettra de comparer la croissance des cernes avec le climat et les indices de sécheresse. Nous avons réalisé la standardisation à partir de l'année 1945 c'est-à-dire 35 ans (en moyenne) avant l'application de la fertilisation/amendement, pour avoir une courbe « *spline* » plus adaptée aux données de croissance sans traitement. Tous les arbres ayant des cernes manquants (largeur de cerne mesurée égale à zéro) dans leur chronologie ont été éliminés (soit 114 arbres, avec des données nulles principalement dans les cinq dernières années avant le carottage) pour ne pas biaiser la tendance de la courbe *spline*.

2.2.2.2 Paramètres du sol

Les paramètres du sol ont été déterminés pour chaque site à partir de la description du profil du sol, et ils ont été utilisés pour le calcul de l'indice de sécheresse (avec le modèle de bilan hydrique).

Les paramètres requis par le modèle pour chaque couche de sol sont : la proportion de racines fines, la proportion de cailloux, l'humidité théorique au point de flétrissement permanente (au point où les végétaux ne peuvent plus extraire l'eau du sol pour des raisons physiques), l'humidité théorique à la capacité du champ, la densité apparente et la réserve utile d'eau dans le sol (l'eau pouvant être consommée par la végétation) (Badeau et Bréda, 2008; Bréda *et al.*, 2002). La réserve utile du sol est calculée par site (voir Tableau 2 p. 18) et par horizon puis sommée sur toute la profondeur enracinée par les arbres. Elle correspond à l'eau disponible entre deux états hydriques caractéristiques : la capacité du champ (quantité d'eau maximale qui eut être retenue par le sol une fois toute l'eau gravitaire écoulée, sans ruissellement ; ici fixée à pF.=2.5) et le volume au point de flétrissement permanent pF.=4.2). La formule (Bréda et al., 2002) utilisée pour le calcul de la réserve utile d'eau par horizon se montre dans l'Equation 1.

$$RU(mm) = (Humidité\ CC\ (\%) - Humidité\ PFP(\%)) \times Densité \times \frac{100 - Cailloux(\%)}{100} \times Profondeur(dm) \quad \text{Equation 1}$$

Où, *RU* est la réserve utile en eau, *Humidité CC* est l'humidité à la capacité du champ, *Humidité PFP* est l'humidité au point de flétrissement permanente, *Densité* est la densité apparente, *Cailloux* est la proportion de cailloux et *Profondeur* est la profondeur de l'horizon du sol.

Le paramétrage du compartiment sol pour les calculs de bilan hydrique a été réalisé par couche pouvant regrouper plusieurs horizons. Nous avons calculé le volume d'eau par « couche » du sol. La notion de couche prise en compte dans notre étude est déterminée par les caractéristiques du sol comme la texture, le % de racine et le % de cailloux (trois éléments forts de la porosité). Il est important aussi de définir les limites de la couche en fonction de la distribution des racines en profondeur. Ces couches sont définies à partir de la description du sol comme des compartiments fonctionnels avec des caractéristiques hydrodynamiques cohérentes et qui diffèrent par la densité de racines fines, dont la distribution est contrôlée par les changements dans la physique du sol (porosité, rupture texturale, compacité) (Badeau et Bréda, 2008; Bréda *et al.*, 2002). Les paramètres par couche du sol sont détaillés dans le Tableau 2 pour tous les sites.

Tableau 2 : Paramètres du peuplement forestier (LAI et jour de débourrement) et du sol utilisés dans le modèle BILJOU©. LAI : Indice foliaire ; Hum. pF4,2 : Humidité de flétrissement permanent au pF=4,2 ; Racine : racine fine ; Densité : Densité du sol ; Réserve en eau : Réserve utile d'eau.

Site	Jour de débourrement		LAI	Racine (%)	Couche du sol (cm)	Réserve en eau	Hum. pF4,2	Densité
	début	fin						
Croix-Scaille-Chêne sessile	120	299	6	85	0-50	48	0,08	1,15
				15	50-120	71	0,09	1,45
Bercé (Chêne sessile)	90	299	6	20	0-50	51,8	0,08	1,15
				80	50-120	120,5	0,18	1,47
Potées (Chêne pédonculé)	115	298	4,6; 4,66; 4,77;4,91	90	0-98	171,9	0,16	1,29
				10	98-120	19,3	0,19	1,5
Fougères (Hêtre)	113	296	4,5;7,5	80	0-80	80,1	0,08	1,1
				20	80-200	82,51	0,08	1,63
Darney (Hêtre)	110	291	4,5;6,5	90	0-127	153,8	0,1	1,35
				10	127-200	46,5	0,08	1,5
Hospices (Sapin)			5;5,2;5,3;5,4;5,5;5,6;5,7;5,8;5,9;6;6,1;6,2;6,3	90	0-60	55	0,073	1,2
				10	60-150	55,5	0,03	1,45
Vologne (Sapin)			5,4;5,5;5,6;5,7;5,8;5,9;6,0;6,1;6,2	60	0-40	39,6	0,11	1,2
				40	40-150	90,7	0,11	1,5
Mortagene parcelle 22 (Sapin)			5,7;6,6,1;6,2	70	0-40	34,5	0,1	1,2
				30	40-150	103,9	0,1	1,5
Mortagene parcelle 2 et 14 (Sapin)	/	/	5,7;5,8;5,9;6,0;6,1;6,2	70	0-40	19,2	0,03	1,2
				30	40-150	103,9	0,1	1,5
Grendelbruch (Sapin)			4,9;5,2;5,4;5,5;5,6;5,7;5,8;5,9	60	0-40	24	0,09	1,2
				40	40-150	99	0,09	1,5
Russ (Sapin)			5,4;5,6;5,7;5,8;5,9;6,0	70	0-45	25,7	0,11	1,3
				30	45-150	110,8	0,11	1,6
Croix-Scaille-Epicéa			4;5,9;6,2;6,5;6,6;6,7;6,8;6,9;7,1;7,3	90	0-50	51,2	0,08	1,15
				10	50-150	50,2	0,09	1,45

2.2.2.3 Indice de sécheresse

L'indice de sécheresse annuel a été calculé rétrospectivement par simulation réalisée en ligne par le modèle Biljou© (Granier *et al.*, 1999). La réalisation d'un calcul de bilan hydrique en ligne par ce modèle requiert : (1) de renseigner un fichier de paramètres spécifiques du site, sol et peuplement et (2) le fichier des données météo (voir point 2.2.1.3 p. 15). Les paramètres nécessaires pour le compartiment sol par couche sont indiqués dans le Tableau 2. Les données sur la phénologie du peuplement concernent la date de débourrement et chute des feuilles (dans le cas des essences décidues) et l'indice foliaire (LAI) du peuplement. Les sites concernent des peuplements avec deux types de phénologie, celle de feuilles persistantes et celles de feuilles décidues. Dans le cas des essences à feuillage décliné (le chêne et le hêtre), nous avons utilisé une date moyenne de débourrement et chute des feuilles issue d'observations sur le site soit sur une placette RENECOFOR proche (Lebourgeois *et al.*, 2006) en particulier pour le chêne sessile (sites de Croix-Scaille et de Bercé) et pour le hêtre du site de Darney. Les observations de Genet (2009) (sites des Potées) et de Peiffer *et al.* (2005) pour le hêtre du site de Fougères ont été utilisées. Les indices foliaires (surface projetée de feuilles en m² par m² de sol) ont été estimés à dire d'expert pour le chêne sessile (site de Bercé et Croix-Scaille), à partir de mesures de Genet (2009) (mesuré en 2007) pour le chêne pédonculé et pour le hêtre à partir de Barbaroux (1997) (site de Darney) et Peiffer *et al.* (2005) (site de Fougères). Dans les cas des essences à feuillage persistant (l'épicéa et le sapin), les indices foliaires ont été calculés à partir de la surface terrière du peuplement (Comm. Pers. N. Bréda). Les données sur les paramètres du sol et la phénologie pour chaque site sont détaillées dans le Tableau 2 p. 18.

Les paramètres du climat sont : la date (année), le jour, la précipitation, le rayonnement global incident, la température moyenne journalière, le vent et l'humidité relative ou pression partielle de vapeur d'eau. Ces paramètres sont formatés dans le fichier météo final (à soumettre à Biljou©) comme « date », « jour », « pluie », « rgl », « tsec », « vent », « hum » et « tvap » respectivement.

Le modèle Biljou© calcule jour après jour les flux d'eau entrants (les précipitations et flux latéraux considérés égaux entre l'amont et l'aval de la parcelle) et les flux sortants (la transpiration des arbres, l'interception des précipitations, l'évaporation du sol et la transpiration sous-étage herbacé ou ligneux, et le drainage de l'eau au-dessous du plancher racinaire). La différence qui résulte de ces deux flux se traduit par une augmentation ou une diminution de la réserve en eau (mm) dans le sol (Granier *et al.*, 1999). La représentation simplifiée des flux se montre dans l'Equation 2.

$$\text{Somme des flux qui entrent} - \text{somme des flux qui sortent} = \text{variation du stock} \quad \text{Equation 2}$$

Le détail des fonctions utilisées par Biljou© pour calculer les flux d'eau élémentaires et la variation du stock d'eau dans le sol décrites sur le site qui synthétise les publications de (Badeau et Bréda, 2008; Granier *et al.*, 1995; Granier *et al.*, 1999). Les variables journalières calculées par Biljou© et prises en compte dans notre étude sont :

- L'évapotranspiration réelle (ETR, en mm) du peuplement, qui est la somme des différents flux d'eau retournant vers l'atmosphère sous forme de vapeur (c'est-à-dire la transpiration des arbres, l'évaporation du sol et transpiration du sous-étage herbacé et arbustif ; et l'évaporation de l'eau interceptée par la couvert)
- L'évapotranspiration potentielle (ETP, en mm) en mm est la quantité d'eau pouvant être évaporée dans l'atmosphère pendant une journée en dehors de tout processus biologique (valeur théorique de l'évapotranspiration). Elle est calculée à partir de la température de l'air, la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air, la vitesse du vent et rayonnement global (par la formule de Penman) (Granier *et al.*, 1999).
- La réserve hydrique relative (REW) qui indique jour par jour le niveau de remplissage du réservoir ; REW est compris entre 1 lorsque le sol à la capacité au champ et 0 lorsque le sol a atteint le point de flétrissement (Granier *et al.*, 1999). Le seuil de 0.4 a été établi de manière systématique pour les essences forestières où le REW au-dessous de cette valeur représente un stress hydrique importante pour les arbres (chute et jaunissement des

feuilles). Ainsi, l'indice de stress hydrique est l'intégrale de l'aire sous 0.4 de la période sèche calculé sur toute l'année.

Le logiciel Biljou© calcule des indicateurs de sécheresse annuelle comme le nombre de jours de stress hydrique (en jours), la date de début du stress (en jour) et l'indice de stress hydrique (sans dimension).

Dans l'étude, nous n'avons utilisé que l'indice du déficit hydrique annuel donné par Biljou© qui est sans doute l'indicateur le plus importante. Nous avons aussi déterminé les indices de déficit hydrique (à partir de REW) pour différents périodes de l'année selon l'espèce, car nous essayons de récupérer les périodes du déficit hydrique où la plante réalise leur croissance. Ainsi, ces périodes ont été déterminées plus ou moins selon la période du stade végétative de la plante (pour les feuillus) et selon la période de croissance du bois de printemps et bois d'été (pour les résineux). Pour les feuillus (chêne sessile, chêne pédonculé et hêtre) la période végétative se correspond à la période dès la date de début de débournement jusqu'à la date de chute de feuilles, la période de printemps concerne plus ou moins la période de la croissance du bois de printemps, et la période d'été considère la période de la croissance du bois d'été. Pour l'épicéa les périodes de végétation, de printemps et d'été se correspondent à la période total de la croissance du bois pendant l'année, la période de la croissance du bois de printemps et la période de croissance du bois d'été. Pour tous les résineux (l'épicéa et le sapin pectiné) trois périodes ont été établi : Juin-juillet, Juillet-Août et Juin-Juillet-Août (voir Tableau 3 ci-dessous). Ces périodes ont été choisis pour tester si pour les résineux il aurait une relation important entre le déficit hydrique du moins de juin, juillet et août (c'est qui se correspond plus ou moins à la croissance du bois d'été pour les essences résineux) et la croissance radiale. Enfin, pour toutes les essences nous avons testé l'indice de déficit hydrique annuel donné par Biljou©.

Tableau 3 : Périodes de l'indice de déficit hydrique annuel I_s par essence et par site.

Site	Essence	Période de I_s (jours)						Année
		Végétative	Printemps	Eté	Juin-juillet	Juliet-août	Juin-juillet-août	
Bercé	Chêne sessile	90-299	90-182	183-299				
Croix-Scaille	Chêne sessile	120-299	120-213	214-299				
Potées	Chêne pédonculé	115-298	115-197	198-298		/		
Fougères	Hêtre	113-296	113-182	183-296				0-365
Darney	Hêtre	110-291	110-182	183-291				
Croix-Scaille	Epicéa	60-273	60-152	153-273	152-212	183-243	152-243	
Vosges	Sapin pectiné		/		152-212	183-243	152-243	
Hospices	Sapin pectiné							

2.3. ANALYSE DES DONNEES

La procédure pour répondre à notre question de recherche consiste à : (i) tester les différences de croissance radial entre les placettes témoins et fertilisés/amendés avant l'application des engrais, (ii) comparer la croissance radiale entre les traitements après l'apport des engrais et (iii) tester l'interaction entre les effets de la fertilisation/amendement et ceux du stress hydrique sur la croissance à court (les premiers cinq années après la fertilisation) et long (plus de cinq ans) termes.

2.3.1. ANALYSE DE VARIANCE

Nous avons réalisé, l'analyse de variance pour évaluer s'il existe des différences significatives de croissance radiale moyenne, soit mesures de la largeur de cerne (L_c) soit l'indice de croissance (I_c) (pour comparer leur différence), entre traitements pendant les dix années précédant l'apport des engrais. Le modèle utilisé était le suivant :

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \gamma_j + n_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad \text{Equation 3}$$

Avec :

Y_{ij} : indice de croissance moyen pour la période de dix ans précédant la fertilisation

μ : moyenne générale de l'indice de croissance

α_i : effet du traitement (factor)

γ_j : effet du bloc

ε_{ij} : erreur aléatoire, $\sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$

σ_ε^2 : variance inter-sujets.

Le test post-hoc de Tukey a permis de comparer les moyennes de L_c et de I_c de chaque traitement avant la fertilisation amendement pour évaluer si le témoin est significativement différent des autres modalités de traitement. Ce test a été appliqué de manière systématique pour tous les sites, sauf pour le site des Potées où les données disponibles avant la fertilisation ont été limitées à 3 ans (assez peu pour appliquer le test).

Nous avons utilisé aussi l'analyse de variance pour évaluer les différences moyennes de l'indice de croissance choisi (I_c) (voir point 2.2.2.1 p. 16), entre le témoin et les autres modalités année par année après l'application la date de fertilisation/amendement. Dans ce cas, la formule utilisée pour l'analyse de variance est similaire à celle présentée ci-dessus (Equation 4). De plus, le test post-hoc de comparaison de moyennes de Tukey a été appliqué de manière systématique pour tous les sites.

2.3.2. AJUSTEMENT DES DONNEES

Il se base à la correction des différences entre moyennes du control et du traitement l'indice de croissance (I_c) (voir point 2.2.2.1), sur 10 ans qui précède l'application de la fertilisation ou amendement (c'est-à-dire pendant ce période les moyennes de I_c ne sont pas différentes). La correction consiste à décaler les moyennes de I_c des traitements à zéro par rapport au control. Puis, l'ajustement au long de la série de chronologie a été élargi à partir de la correction sur les 10 ans précédant la fertilisation (pour chaque traitement). Il s'agit donc, pour chaque individu, d'opérer une translation sur l'intégralité de sa chronologie identique à l'état existant entre l'indice de croissance moyen du témoin et celui du traitement auquel il appartient. Le grade d'ajustement dépend du grade de différence existant. Ainsi, les sites où la différence moyenne de I_s entre le control et le traitement n'étaient pas significatives, l'ajustement est faible, par contra, les sites avec une différence très significative entre le control et le traitement, le grade d'ajustement sera fort. L'ajustement de données a été fait de manière systématique pour tous les sites d'études sauf pour le site de Potées qui 12 ans à la data de fertilisation et de plus il n'a pas des années sèches. Ainsi, par la suite nous ne travaillerons pas avec le site des Potées.

2.3.3. MODELE A EFFETS MIXTES

L'interaction entre les effets de la fertilisation et du stress hydrique a été testée par un modèle à effets mixtes permettant de prendre en compte le fait que la contribution des arbres à la variance est un effet aléatoire que les indices annuelles de croissance sont des mesures répétées dans l'arbre. Pour cette partie de l'analyse, nous avons utilisé le logiciel SAS (version 9.3). Dans le modèle mixte, nous avons utilisé l'indice de sécheresse (répresseur ou factor), le traitement (effet traitement à « i » modalités) et le bloc (effet du bloc à « j » modalités) comme variables à effet fixes. L'effet du sujet (arbre) comprend « k » individus et chaque sujet avec « n » fois répétitions (« n » cernes mesurés ou « n » années)

Le modèle mixte utilisé dans l'étude est :

$$Y_{ijkn} = \mu + \alpha_i + \beta x_{ijkn} + \delta_i x_{ijkn} + \gamma_j + n_{ij} + a_k + \varepsilon_{ijkn} \quad \text{Equation 4}$$

Avec :

Y_{ijkn} : indice de croissance

μ : moyenne générale de l'indice de croissance

α_i : effet du traitement (factor)

β : coefficient fixe.

X_{ijkn} : indice de sécheresse

δ_i : écart à la pente β

γ_j : l'effet du bloc

η_{ij} : interaction entre l'effet traitement et l'effet bloc

α_k : effet aléatoire du sujet, $\sim N(0, \sigma_s^2)$

ε_{ijkn} : erreur aléatoire, $\sim N(0, \sigma_e^2)$

σ_s^2 : variance inter-sujets et σ_e^2 est la variance intra-sujet.

Au total, nous avons 145048 observations dont 89 arbres de chêne sessile, 30 de chêne pédonculé, 997 de hêtre, 1070 de sapin et 702 d'épicéa. Un résumé des caractéristiques principales avec le jeu de données final par site d'étude se montre en annexe 1 p. 55. Tous les résultats montrés dans l'étude sont réalisés avec ce jeu de données final.

3. RESULTATS

3.1. CROISSANCE AVANT LA FERTILISATION

3.1.1. TEST DES DIFFERENCES ENTRE MODALITES

Les analyses de variance portant sur la croissance moyenne observée pour chaque site au cours des dix années précédant la date de fertilisation ont montré, pour certains dispositifs, des effets significatifs pour les variables 'traitement', 'bloc' et leur interaction (Tableau 4). Ces effets indiquent que les croissances moyennes n'étaient pas toutes identiques avant même l'application de la fertilisation entre les différentes modalités de traitement. Les résultats obtenus avec l'indice de croissance I_c sont proches de ceux obtenus avec la largeur de cerne L_c (par site), sauf pour Les Hospices (où le témoin et au moins un traitement sont différents). Les effets « bloc » ne sont significatifs (au seuil de 5 %) sur L_c que pour Mortagne, et sur I_c que pour Bercé, Darney et Croix-Scaille-Epicéa (voir tableau 4 ci-dessous).

Tableau 4 : Analyse de variance testant les effets du traitement, du bloc et de leur interaction sur la croissance moyenne des dix années précédant la fertilisation. L'analyse a été réalisée en considérant (i) la largeur de cerne brute (L_c) ou (ii) l'indice de croissance (I_c) comme variables à expliquer. Les valeurs de F accompagnées de la p-value associée sont présentées.

Site	F value avec L_c			F value avec I_c		
	Trait	Bloc	Trait*Bloc	Trait	Bloc	Trait*Bloc
Bercé	2,57(*)	1,6	1,38	15,54***	12,46***	2,92*
Croix-Scaille-Chêne	2,31(*)	0,35	1,89	0,36	0,23	1,87
Potées	1,1	0,79	4,46*			
Darney	5,35***	1,86	2,68**	2,39*	2,77*	1,25
Fougères	2,84*	0,35	2,73**	5,15***	0,59	1,86*
Grendelbruch	0,85	0,04	0,1	1,54	0,21	0,56
Mortagne	3,85**	14,75**	0,27	5,29***	0,58	1,35
Russ	0,87	0,13	1,32	0,66	0,07	0,53
Vologne	1,91	0,08	1,28	1,51	1,42	1,35
Hospices	1,58	/	/	2,17*	/	/
Croix-Scaille-Epicéa	3,08*	2,36(*)	2,31**	20,86***	18,38***	2,07*

$Pr > F$: (*) : <10%; * : <5%; ** : <1%; *** : <0,1%

Le test de comparaison de moyennes de Tukey, montre que la différence moyenne de L_c entre le témoin et au moins une modalité de traitement n'est significative que pour le site de Darney, qui présente une différence significative (au seuil 5 %) de moyenne de la largeur de cerne entre la modalité témoin et celle d'au moins une des modalités de fertilisation. Dans le cas de I_c , il y a une différence significative entre le témoin et au moins une modalité de traitement pour les sites de Bercé, Croix-Scaille-Epicéa, Darney, Fougères et Mortagne, tandis que pour les autres sites (Croix-Scaille-Chêne, Grendelbruch, Russ, Vologne, les Hospices et les Potées) la différence n'est pas significative.

D'après les résultats de comparaison de I_c et L_c , nous utiliserons pour la suite de l'étude, l'indice de croissance I_c car il garde les signaux à haut fréquence requis pour le mettre en relation avec l'indice de déficit hydrique annuel.

3.1.2. AJUSTEMENT DES DONNEES

L'existence de différences de croissance antérieures à l'application de la fertilisation complique l'évaluation des effets de la fertilisation sur la croissance. Pour limiter le biais d'interprétation, les données de croissance (I_c) de chaque individu ont été corrigées puis ajustées (voir point 2.2.3.2 p. 21).

Nous avons réalisé l'ajustement des données de l'indice de croissance au long de la série chronologique de tous les sites d'étude (voir annexe 14 p. 76). Le degré d'ajustement peut être fort pour certains sites. Ainsi, il semblerait que l'ajustement pour le site de Bercé ait augmenté les différences entre traitements avant 1960 et après 1985. Dans le cas de Mortagne, l'ajustement fait sur une période où les variations de croissance entre modalités étaient plutôt plus fortes que pour le reste de la chronologie, ce qui a eu pour effet d'augmenter les divergences globales (voir Figure 1 ci-dessous).

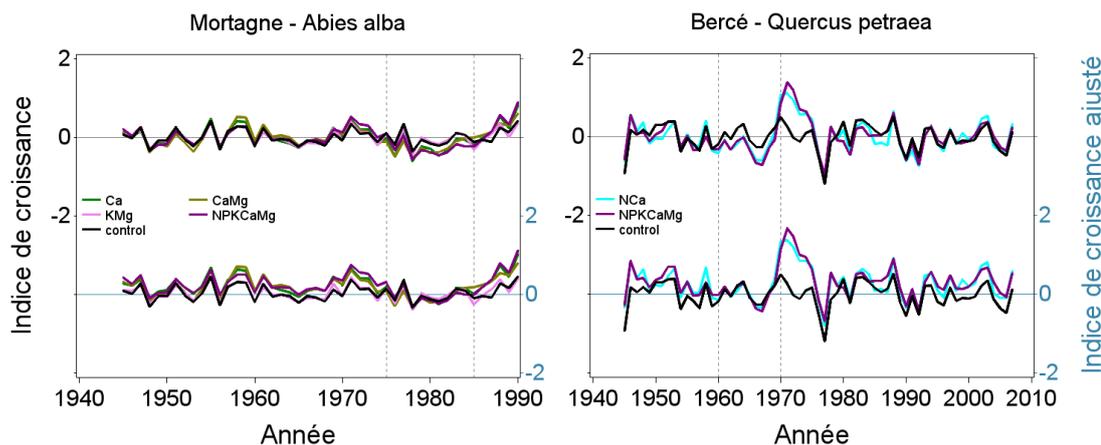


Figure 2 : Comparaison de l'indice de croissance (I_c) ajusté et non au long de la série chronologique et basé sur la correction de 10 ans précédant la fertilisation, pour les sites de Mortagne et Bercé. La période de correction est représentée par les pointillés verticaux.

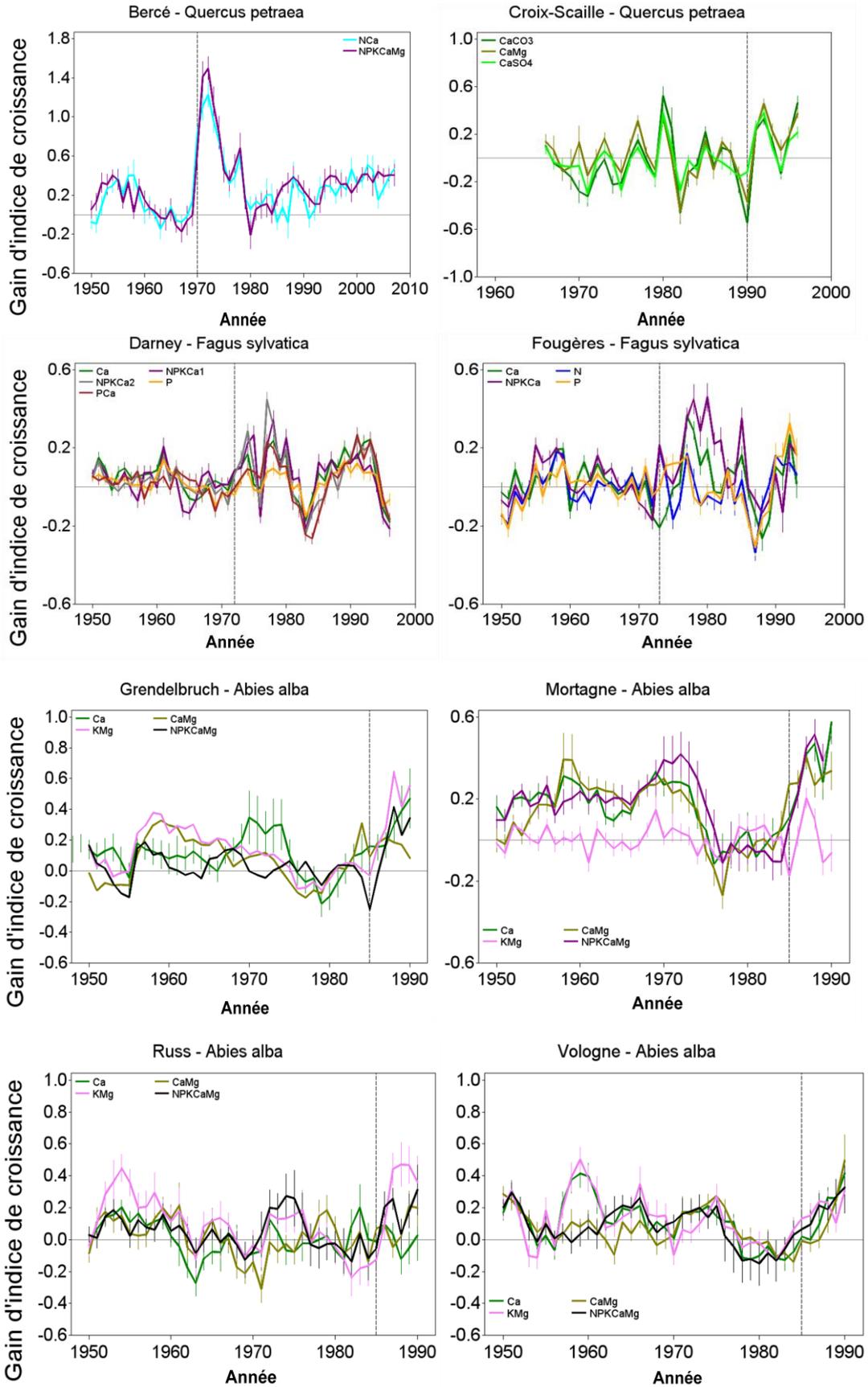
L'ajustement réalisé n'étant qu'une simple translation de l'intégrité de chaque série chronologique (par traitement et par site d'étude), il n'aura pas d'influence sur le calcul de l'interaction entre la fertilisation et sécheresse, qui est notre question de fond.

3.2. EVALUATION DE L'EFFET DE LA FERTILISATION

3.2.1. EVOLUTION DU GAIN DE CROISSANCE

Le gain de l'indice de croissance I_c par rapport au témoin pour toutes les modalités de fertilisation, augmente de manière systématique par rapport au témoin pendant les cinq premières années après la fertilisation sauf pour la modalité N chez l'épicéa et le hêtre à Fougères (Figure 2) où il diminue.

A plus long terme, le gain d'indice de croissance varie fortement selon le site et l'essence. Ainsi, pour le hêtre du site de Fougères, le gain de tous les traitements devient négatif 15 ans après la fertilisation puis revient ensuite à des valeurs positives (Figure 2 p. 25). Des comportements similaires sont observés pour le hêtre à Darney. Dans le cas du sapin des Hospices, après les cinq premières années, le gain de croissance diminue de manière continue jusqu'à atteindre des valeurs négatives sept ans après la fertilisation pour les modalités N et NP. A Bercé, le chêne sessile montre un gain s'annulant pendant quelques années pour redevenir légèrement positif ensuite. Les données disponibles pour les autres sites ne permettent pas d'évaluer l'évolution du gain de croissance à plus long terme.



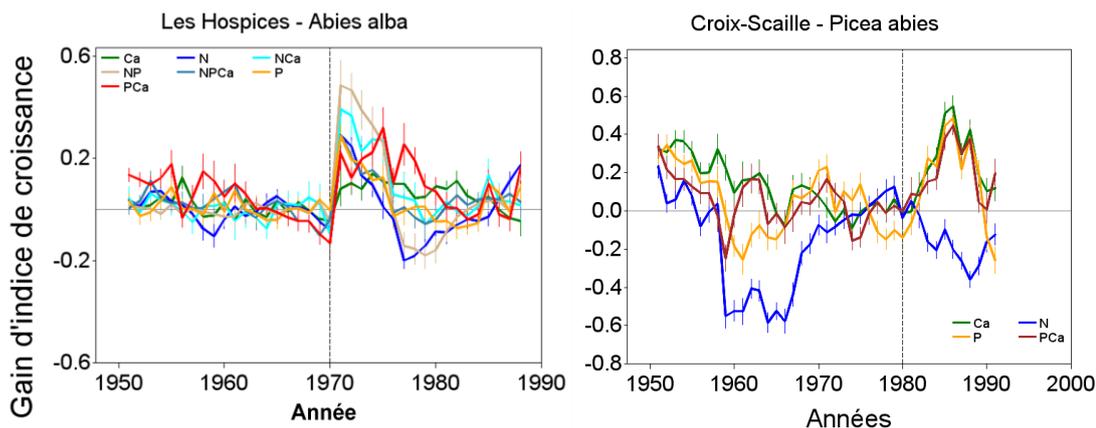


Figure 3 : Evolution du gain de croissance de chaque modalité de fertilisation par rapport au témoin pour Bercé, Croix-Scaille-Chêne, Darney, Fougères, Grendelbruch, Mortagne, Russ, Vologne, Hospices, Croix-Scaille-Epicéa où les barres d'erreur représentent les erreurs standards de la moyenne (n égal à 13, 18, 123, 76, 40, 45, 40, 33, 61, 140 respectivement). La date de fertilisation est représentée par les pointillées verticales.

3.2.2. INDICE DE DEFICIT HYDRIQUE

Pour chaque site, les relations entre croissance et sécheresse ont été testées en considérant plusieurs périodes d'intégration de déficit hydrique (cf. 2.2.2.3 p. 19 et Tableau 3 p. 20). Nous avons choisi les périodes en considérant la meilleure significativité des effets et où le modèle mixte a un AIC le plus faible selon le site (Tableau 5).

Tableau 5 : Date de début et fin de période de calcul de l'indice déficit hydrique sélectionnée par essence et par site.

Site	Essence	Période de Is	
		début	fin
Bercé	Chêne sessile	01-juin	31-juil
Croix-Scaille	Chêne sessile	02-juil	31-août
Darney	Hêtre	02-juil	18-oct
Fougères	Hêtre	02-juil	23-oct
Vosges	Sapin	01-juin	31-juil
Hospices	Sapin	01-juin	31-juil
Croix-Saille	Epicéa	01-mars	01-juin

L'indice de déficit hydrique varie entre 0 et 32 avec la valeur la plus forte ayant été calculée pour le site de Fougères. Les valeurs maximum les plus faibles concernent les sites de Mortagne et Darney. Les années 1976, 1989 et 1996 montrant des déficits hydriques importants et précoces (commençant vers le mois de mars) ont eu le plus fort impact sur la croissance de l'arbre. Globalement, les années ayant les plus fortes valeurs d'indice de déficit hydrique sont dans l'ordre chronologique : 1976, 1989, 1990, 1993 et 1996 (voir Figure 3).

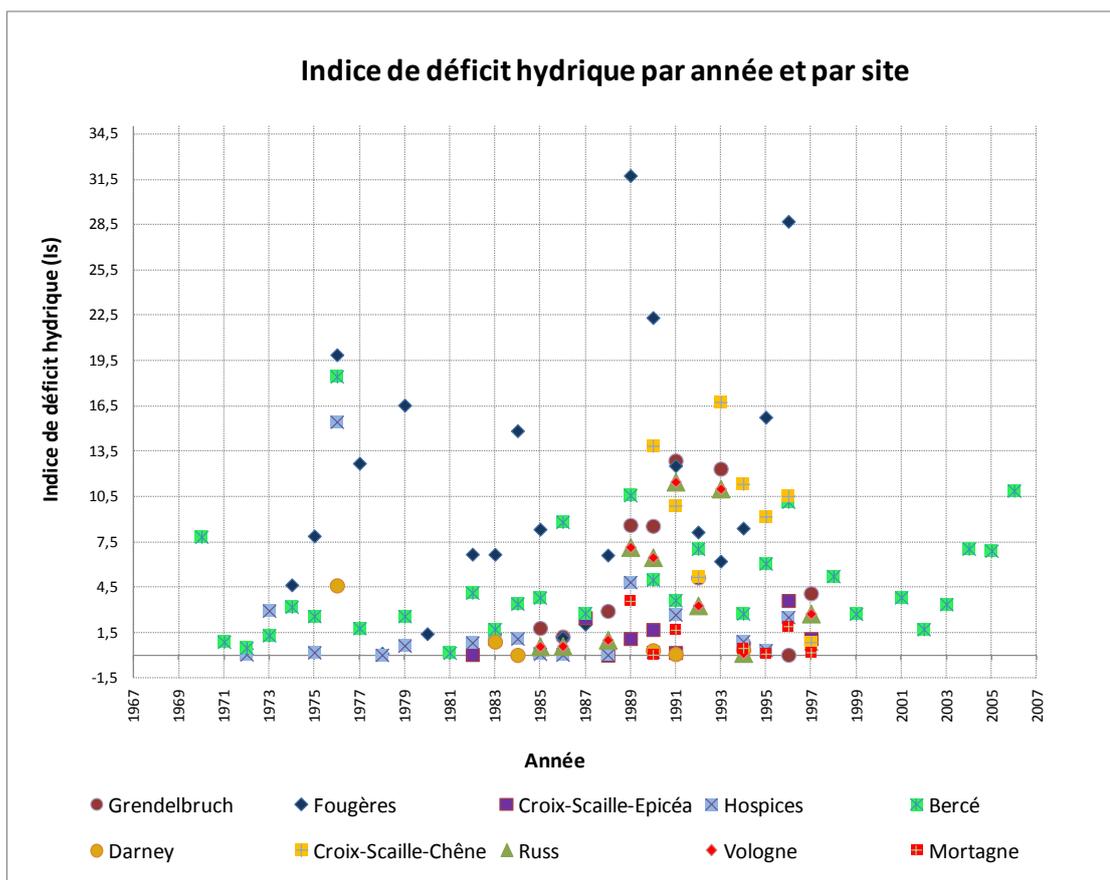


Figure 4 : Distribution de l'indice de déficit hydrique par année et par site.

3.2.3. ANALYSE DE VARIANCE APRES LA FERTILISATION

L'analyse de variance faite pour chaque année après la fertilisation montre des différences de croissance significatives entre traitements dans la plupart des sites (Tableau 6). Seuls les sites de Vologne et Mortagne ne montrent aucune différence significative entre la croissance des arbres témoins et celle des arbres fertilisés. Le site de Potées a été exclu car il n'a pas des années sèches après la date de fertilisation. Le site de Vologne ($I_s \approx 3$ en 1989) n'a pas de différences significatives entre la moyenne de I_c du témoin et au moins une modalité de traitement. Les sites de Croix-Scaille-Chêne, Mortagne et Russ ont connu seulement deux années sèches avec une différence significative de l'indice de croissance ajustée entre le témoin et au moins une modalité de traitement tandis que les sites de Bercé, Fougères et les Hospices ont la majeure quantité des années qui accomplissent ces conditions (voir Tableau 6 ci-dessous).

Tableau 6 : Analyse de variance entre traitements de l'indice de croissance I_c après la fertilisation pour les années sèches où le contrôle est différente pour d'au moins un type de traitement. Les valeurs de F accompagnées sont présentées. La date de la fin de la période d'investigation se montre comme Fin période.

Site	F value du trait avec I_c ajusté																			Fin période									
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1977	1986	1987	1989	1995	1996	1998	1999	2001	2002	2004	2005	2006										
Bercé	7	23	51	28	19	9	6	7	5	6	5	7	4	5	8	9	5	6	6	2007									
Croix-Scaille- Chêne	1990	1996	5	8																	1996								
Potées	1998	6																		2007									
Darney	1976	1983	1984	1990	1991	1994	7	12	9	3	8	3									1996								
Fougères	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1982	1985	1986	1987	1988	1989	1992	5	4	3	14	16	7	15	5	9	5	9	3	5	7	1994
Grendelbruch	1985	1986	1988	1990	2	3	5	3													1990								
Mortagne	1989	1990	8,17	8,57																1990									
Russ	1988	1989	4,25	3,74																1990									
Hospices	1972	1973	1975	1976	1978	1979	1982	1985	1988	14	10	8	2	8	5	3	2	3				1988							
Croix-Scaille- Epicéa	1987	1988	1989	1990	1991	24	41	12	3	8											1991								

$Pr>F$: ■ < 0,1% ■ < 1% ■ < 5%

Les années avec l'indice de sécheresse forte ne correspondent pas nécessairement aux années où il existe une différence significative de I_c entre arbres témoins et fertilisés/amendés. Ainsi, la différence de l'indice de croissance en 1993 entre les placettes des témoins et fertilisés n'est pas significative, même si pour cette année les valeurs de l'indice de sécheresse sont fortes (voir annexe 15 p. 80).

3.3. EFFET DE LA SECHERESSE SUR LA CROISSANCE RADIALE APRES LA FERTILISATION

L'indice de déficit hydrique et l'indice de croissance ajusté calculés précédemment ont été utilisés pour tester le modèle mixte après l'application de la fertilisation. Le modèle a été appliqué pour tous les sites. L'indice de déficit hydrique prend la valeur de zéro pour les années pendant lesquelles la réserve relative en eau du sol ne descend pas en dessous de 0.4. Le modèle a été évalué pour différentes périodes d'indice de déficit hydrique (voir Tableau 2 p 18). Nous avons choisi le modèle avec AIC le plus faible testé avec l'Equation 4 (voir point 2.2.3.3 p. 21). Les résultats du modèle sont donnés dans le Tableau 7 (ci-dessous).

Tableau 7 : Effets du traitement (Trait), de l'indice de déficit hydrique (Is) et de leur interaction sur l'indice de croissance (Ic). Les périodes de Is varient entre sites ainsi : azur : 1 juin-31 juil ; orange : 2 juil.-31 août ; vert : 2 juil.-18 oct; jaune : 2 juil.-23 oct; violet : 1 mars-1 juin. Les valeurs de F accompagnées du p-value associé sont présentées.

site	Trait	Is	Is*Trait
Bercé	21,11***	128,2***	1,78
Croix-Scaille-Chêne	4,9**	35,31***	3,79*
Darney	7,33***	847,6***	11,23***
Fougères	3,17*	87,88***	1,44
Grendelbruch	1,1	112,55***	0,43
Mortagne	10,5***	128,3***	3,09*
Russ	0,86	0,05	0,64
Vologne	1,38	6,73**	0,74
hospices	3,75***	602,21***	4***
Croix-Scaille-Epicéa	26,07***	30,27***	5,12***

Pr>F: () : <10%; * : <5%; ** : <1%; *** : <0,1%*

La croissance représentée par I_c est affectée par le traitement (pour la plupart des sites sauf pour Grendelbruch, Russ et Vologne) et par la sécheresse représentée par I_s (pour la plu part des sites sauf pour Russ où il n'y a pas de déficit hydrique). I_s affecte aussi de manière très importante I_c . Cependant l'effet du traitement quand le déficit hydrique augmente n'est significatif que pour le site de Darney, Croix-Scaille-Epicéa, Hospices, Croix-Scaille-Chêne et Mortagne d'après l'analyse de variance (résultats modèles mixte). Par ailleurs, les effets bloc testés de manière systématique ne sont jamais significatifs et ils n'affectent pas l'interprétation de résultats.

Les modalités des traitements qui affectent de manière significative I_c lors des années avec déficit hydrique fort sont montrées dans le Tableau 8 (ci-dessous).

Tableau 8 : Effet de chaque modalité de traitement (Trait) en interaction avec l'indice de déficit hydrique (Is) sur l'indice de croissance (Ic) par rapport au témoin. Les valeurs de F accompagnées de la p-value associée sont présentées.

site	Is*Trait													
	Ca	CaCO ₃	CaSO ₄	CaMg	NPKCa1	NPKCa	NPKCaMg	KMg	P	PCa	NCa	NPCa	NP	N
Darney	-2,07				-5,47	-5,25			-1,19	-0,72				
Fougères	-0,36					0,23			0,82					1,81
Hospices	-0,29								-1,84	-3,93	-2,75	-1,53	-2,12	0,96
Bercé						-1,50					-1,77			
Croix-Scaille-Epicéa	-2,96								-2,92	-2,89				0,01
Croix-Scaille-Chêne		-3,15	-2,41	-2,44										
Grendelbruch	1,10			-0,07			0,53	0,59						
Mortagne	-2,30			0,38			-1,77	-1,28						
Russ	0,40			1,43				1,08	0,86					
Vologne	-0,42			-0,21			0,15	-1,17						
Pr>F :				<0,1%		<1%		<5%		<10%				

L'effet de différentes modalités de traitement quand il y a un déficit hydrique (interaction entre Is et traitement) varie selon le site. L'effet des modalités NPKCa (avec ses deux doses voir Tableau 1 p. 14) et PCa sur Ic des arbres (Darney et Hospices respectivement) sont les plus significatifs parmi les autres modalités testées. Par contre, aucune interaction n'est observée pour les modalités KMg (Vosges) et NPCa (Bercé). Les sites de Grendelbruch, Russ et Vologne sont les seuls où il n'y a aucune interaction significative, quelle que soit la modalité de traitement considérée.

L'effet de la fertilisation du sol sur la croissance radiale des arbres en conditions de sécheresse peut varier selon l'intensité, la fréquence et la durée de la sécheresse. Dans les cas des sites où il y a une interaction entre l'indice de déficit hydrique (Is) et le traitement (voir Tableau 7 p. 29), les résultats sont divers. La Figure 4 p. 31 montre que les Hospices est le site où la croissance est la plus affectée par la sécheresse car les valeurs de Ic peuvent descendre autour de -1.0 pour tous les traitements confondus. Par contre, l'épicéa de Croix-Scaille puis le sapin de Mortagne semblent être les moins affectés par la sécheresse, car les valeurs de Ic pour tous les traitements confondus, peuvent atteindre jusqu'à 2 et 1 respectivement par rapport aux autres sites. L'année la plus sèche avec l'effet le plus dépressif sur la croissance (1976), pour Darney et Hospices, est à quatre et six ans après l'application d'engrais. Dans le cas des Hospices, l'effet significatif de PCa et NCa favorise la croissance (par rapport au témoin) mais il diminue au cours du temps et l'effet significatif de NP en 1976 est dépressif (par rapport au témoin) pouvant devenir positif au cours du temps. Dans le cas de Darney, l'effet significatif de Ca, NPKCa1 et NPKCa (dans des conditions de déficit hydrique) ne semble améliorer la croissance (par rapport au témoin) que suite à l'année 1976 (sécheresse intervenant quatre ans après l'apport d'engrais), la plus sèche et avec effet dépressif sur l'indice de croissance de hêtre dans ce site. Les années plus récentes et avec l'indice de déficit hydrique le plus fort de Croix-Scaille-Chêne et Mortagne sont 1993 (trois ans après l'apport d'engrais) et 1989 (quatre ans après l'apport d'engrais) respectivement. Dans le cas de Croix-Scaille-Chêne, l'effet significatif de CaCO₃, CaSO₄ et CaMg sur la croissance semble augmenter (par rapport au témoin) au cours du temps. Dans le cas de Mortagne, l'effet de Ca améliore la croissance (par rapport au témoin) mais il diminue au cours du temps. Il semble que l'effet de Ca, P et PCa sur la croissance de l'épicéa de Croix-Scaille tamponne l'effet de l'indice de déficit hydrique sur la croissance au cours du temps. Une représentation graphique de l'évolution à court et long terme de l'effet de la fertilisation/amendement sur l'indice de croissance en fonction de l'indice de sécheresse se montre dans la Figure 4 (ci-dessous).

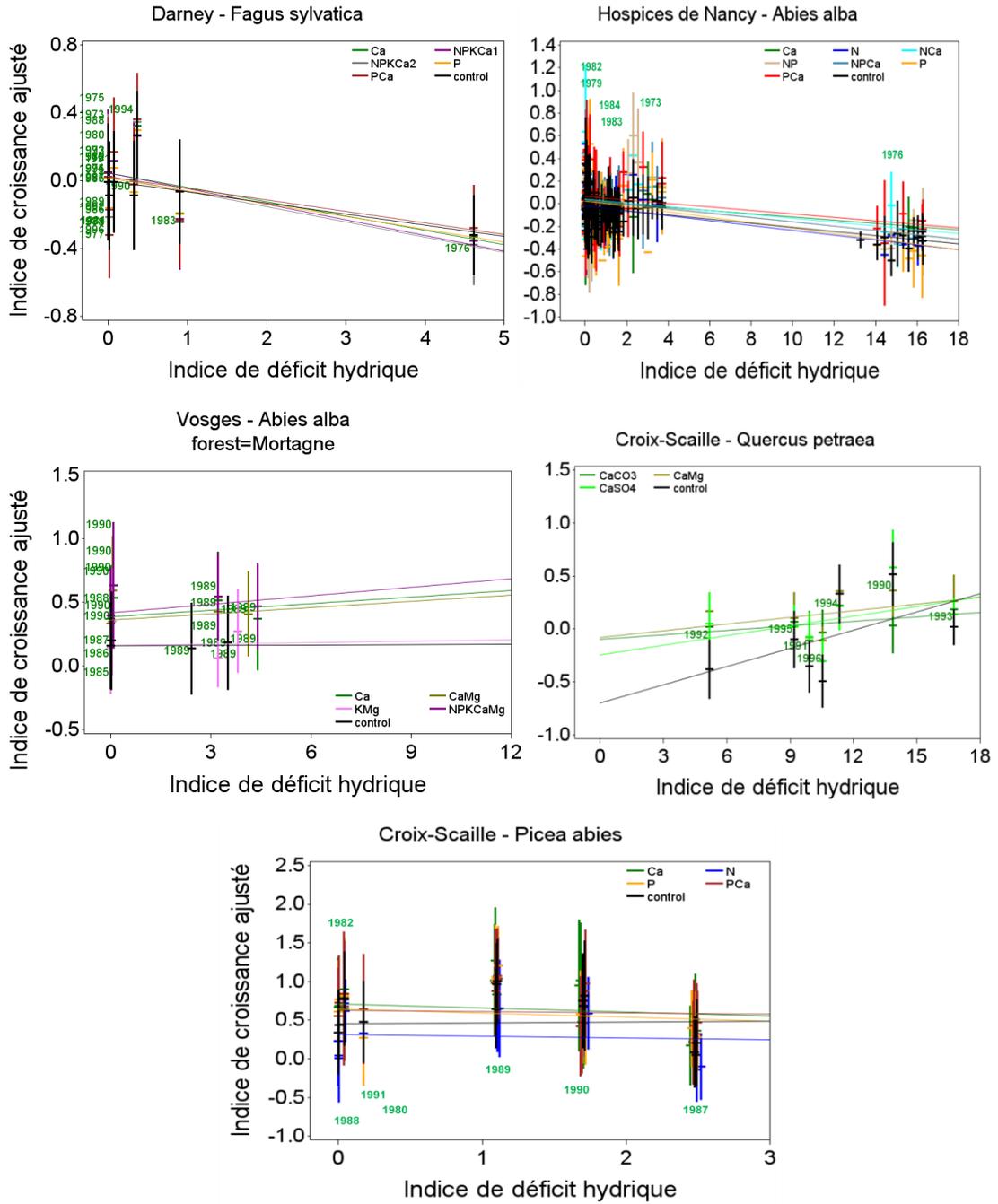


Figure 5 : Distribution d'années sèches selon l'indice de croissance (I_c) et l'indice de déficit hydrique (I_s) par traitement et pour les sites où l'interaction I_s *Traitement est significative d'après le modèle mixte.

4. DISCUSSION

4.1. EVALUATION DE L'EFFET DE LA FERTILISATION

Les résultats de l'analyse de variance effectuée année par année après fertilisation montre une différence significative entre la moyenne de I_c du témoin et au moins une modalité de traitement pour la plupart des années pour les sites de Bercé (chêne), Darney et Fougères (hêtre), Grendelbruch et Mortagne (sapin) et Croix-Scaille (épicéa). Par contre, la plupart des années pour les autres sites ne présentent pas de différence significative entre la moyenne de I_c du témoin et au moins une modalité de fertilisation. Dans le cas de Bercé, la plupart des années supérieures à 1987 (15 ans après la période de correction de I_c) n'ont pas de différence entre témoin et autres modalités de traitement. Cela correspond au possible biais crée par l'ajustement appliqué sur plus de 15 ans après la période de correction. L'ajustement à long terme n'est pas adapté car il pourrait créer des différences significatives entre le témoin et les autres traitements comme dans le cas de Bercé. Il convient donc de rester prudent quant à l'interprétation de l'effet de la fertilisation sur la croissance quand il y a un processus d'ajustement à long terme.

4.2. EVALUATION DE L'EFFET DE LA FERTILISATION SUR LA CROISSANCE RADIALE DANS DES CONDITIONS DE SECHERESSE

Les résultats de l'étude, en appliquant l'analyse de variance et le modèle mixte, montrent que l'effet de la fertilisation ou amendement sur la croissance radiale des arbres sont cohérents avec les résultats des études précédentes effectuées (e.g. Becker, 1992; Bonneau, 1995; Fehlen et Picard, 1994). Cependant, l'effet de l'apport d'engrais sur la croissance radiale en situation de déficit hydrique varie selon le site et l'espèce (Tableau 9).

Tableau 9 : Synthèse de résultats. En gris sont représentés les effets du traitement (Trait quand $I_s=0$) et de l'interaction entre l'indice de déficit hydrique (I_s) et le traitement d'après le modèle mixte. Les couleurs orange, jaune, bleu et vert présentent l'effet du traitement sur la croissance radiale les années 1996, 1976, 1989 et 1987 respectivement quand I_s est maximum, d'après l'analyse de variance après la date de fertilisation/amendement. * : effet significatif du traitement ; ns : effet non significatif du traitement ; ↓ : effet négatif de l'interaction.

Traitement	Site														
	Croix-Scaille-Chêne			Darney			Mortagne			Hospices			Croix-Scaille-Epicéa		
	Trait (Is=0)	Is*Trait	Trait (Is=max)	Trait (Is=0)	Is*Trait	Trait (Is=max)	Trait (Is=0)	Is*Trait	Trait (Is=max)	Trait (Is=0)	Is*Trait	Trait (Is=max)	Trait (Is=0)	Is*Trait	Trait (Is=max)
Ca				*	↓	ns	*	↓	ns	ns	ns	ns	*	↓	*
CaCO ₃	*	↓	*												
CaSO ₄	*	↓	ns												
CaMg	*	↓	*				*	ns	*						
NPKCa1				*	↓	*									
NPKCa				*	↓	ns									
NPKCaMg							*	ns	*						
KMg							ns	ns	ns						
P				ns	ns	ns				*	ns	ns	ns	↓	*
PCa				ns	ns	ns				*	↓	ns	*	↓	*
NCa										*	↓	ns			
NPCa										*	ns	ns			
NP										*	↓	ns			
N										ns	ns	ns	ns	ns	*

Bonneau (1995) et Nys et al. (1985) ont affirmé que des conditions climatiques défavorables constituent, quelle que soit la manière dont on a amélioré la nutrition minérale, un facteur limitant qui empêche l'expression de la fertilisation. Dans l'étude, les résultats de l'analyse de variance pour

les années les plus sèches (voir annexe 16 p. 81) pour Darney, Croix-Scaille, les Hospices et Mortagne (1976 pour les sites de Darney et Hospices, 1989 pour Mortagne et 1996 pour Croix-Scaille-Chêne), où il y a une chute de la croissance radiale pour toutes les modalités de traitements, montrent un effet significatif du traitement fertilisé ou amendé sur la croissance radiale. Cependant, il y a une différence significative, entre la croissance radiale du témoin et les modalités $\text{CaCO}_3/\text{CaMg}$ et $\text{CaMg}/\text{NPKCaMg}$ pour le chêne sessile (Croix-Scaille) et le sapin (Mortagne) respectivement. Il semblerait donc que la croissance radiale pour le chêne sessile de Croix-Scaille et le sapin de Mortagne, soit améliorée par rapport au témoin avec les modalités $\text{CaCO}_3/\text{CaMg}$ et $\text{CaMg}/\text{NPKCaMg}$ respectivement mais il diminue en cas de déficit hydrique. Cependant, l'interprétation des ces résultats doit rester prudente car (i) l'effet du traitement peut affecter la croissance à court ou long terme (dans tous les cas globalement semble que l'effet du traitement diminue avec le temps (voir Tableau 9 p. 33)) et (ii) les arbres peuvent réagir plus rapidement ou plus lentement à la fertilisation ou amendement dans certaines espèces de certains sites. Ainsi, par exemple pour le hêtre de Darney et le sapin des Hospices d'après la Figure 2 p. 25, la modalité Ca, NPKCa1 et NPKCa du site Darney sont dépressifs par rapport au témoin en 1976 (4 ans après la fertilisation) par contre, les modalités PCa, NCa et NP sont favorables en 1976 (6 ans après la fertilisation). De plus, pour le sapin de Mortagne, l'effet du calcium affecte positivement dès l'application du traitement. Il semblerait donc que pour le hêtre du site de Darney la fertilisation commence à affecter la croissance radiale plus tardivement que pour le sapin de Mortagne ou des Hospices.

4.2.1. EFFET DE L'AZOTE SUR LA CROISSANCE RADIALE EN CONDITIONS DE DEFICIT HYDRIQUE

Un des effets les plus marqués est l'effet de l'azote sur la croissance radiale. L'effet dépressif de l'azote sur le sapin des Hospices, l'épicéa de Croix-Scaille et le hêtre de Fougères (voir Figure 2 p. 25) a été mis en évidence par Becker (1992), Fehlen et Picard (1994) et Marsalle (1996) respectivement. Cependant, d'après des résultats du modèle mixte testé dans l'étude, l'effet dépressif de l'azote pour ces sites n'est pas significatif quand il y a déficit hydrique. Dans le cas de l'épicéa, la croissance radiale (Figure 2 p. 26) en appliquant la modalité azoté diminue (par rapport au témoin) et devient la plus basse que ceux d'autres modalités en 1989 (année la plus sèche pour ce site). Pour le hêtre de Fougères, l'effet de la modalité azoté sur la croissance radiale est dépressif (par rapport au témoin) dès l'application de la fertilisation et il reste globalement dépressif avec des faibles variations au long de la série chronologique. Ainsi, les années 1975, 1976, 1989 et 1990, l'effet de l'azote et les autres traitements devient très dépressif (voir Figure 2 p. 25). Pour les sapins des Hospices, l'effet de l'azote sur la croissance augmente suite à la fertilisation puis deux ans après la fertilisation l'effet devient et se maintient dépressif au long de la série chronologique sauf à la fin (3 ans avant le carottage de 1989). Pour ces trois sites, nous avons par un côté les résultats du test de l'analyse de variance qui montrent l'effet significatif de l'apport de la modalité azoté sur la croissance radiale pendant l'année 1976 (Croix-Scaille-Epicéa, Fougères et Hospices). Par l'autre côté, nous avons les résultats du modèle mixte qui montrent les effets non significatifs de l'azote sur la croissance radiale de l'épicéa de Croix-Scaille et le sapin des Hospices quand le déficit hydrique est à zéro et de plus, la relation croissance radiale-déficit hydrique n'est pas différent entre la modalité azotée et le témoin. Ainsi, l'azote n'a pas un effet significatif, ni dépressif ni favorable, sur la croissance radiale quand le déficit hydrique augmente ($I_s > 0$) (voir Figure 4 p. 31). Les résultats du modèle mixte peuvent être liés au fait qu'il se base sur une relation linéaire qui ajuste les données même s'il n'est pas nécessairement la relation à suivre. De plus, il n'y a pas assez de données de déficit hydrique pour établir une relation robuste entre la croissance radiale et le déficit hydrique.

4.2.2. EFFET DU CALCIUM SUR LA CROISSANCE RADIALE EN CONDITIONS DE DEFICIT HYDRIQUE

L'amélioration de la croissance radiale (par rapport au témoin) par certains traitements en situation de déficit hydrique, pourrait être liée à l'amélioration du sol et à l'amélioration de la

croissance des racines fines pour l'absorption de l'eau. Selon Bakker (1998), l'amendement stimule la minéralisation de la matière organique du sol qui pourrait assurer le maintien de la croissance radiale à moyen et long terme. De plus, l'amendement a un effet direct sur la quantité de racines fines, en surface et en profondeur ce qui aidera les arbres à extraire l'eau profonde du sol. Ainsi, selon les résultats du modèle mixte, pour Darney, Hospices, Mortagne, Croix-Scaille (épicéa et chêne), les modalités concernant le calcium (NPKCa1, NPKCa et Ca ; PC, NCa ; Ca ; Ca, P et PCa ; et CaCO₄, CaMg et CaSO₄ respectivement) ont un effet significatif (par rapport au témoin) sur la croissance radiale en situation de déficit hydrique et globalement il diminue au cours du temps. Cependant, il faut rester prudent car toutes les modalités contenant le calcium ne sont pas favorables. Ainsi, l'effet des autres traitements sur la croissance radiale de Darney, Hospices, Bercé, Fougères et Vosges concernant le calcium (PCa ; NPCa et Ca ; CaMg et NPKCaMg ; Ca, et NPKCa ; NCa et NPKCaMg respectivement) ne sont pas différents du témoin en conditions de déficit hydrique.

L'effet du traitement à court et long terme n'a pas été analysé en détail. Cependant, d'après les résultats du modèle mixte (voir Figure 4 p. 31), pour le cas de Darney et Mortagne, il semblerait que l'effet du traitement Ca sur la croissance radiale intervient plus lentement sur le hêtre de Darney que sur le sapin de Mortagne où l'année la plus sèche (1976 et 1989 respectivement) (voir annexe 16 p. 81) intervient quatre ans après la fertilisation. Ainsi, pour Darney, en 1976 la croissance radiale du seul traitement avec un effet significatif (NPKCa1) est au-dessous de celui du témoin, tandis que pour Mortagne, en 1989 la croissance radiale des traitements (CaMg et NPKCaMg) avec effets significatifs sur la croissance est au-dessus du témoin (voir Figure 4 p. 31). Pour le sapin des Hospices, l'effet du traitement concernant le Ca en 1976 (six ans après la date de fertilisation) est au-dessus du témoin. Dans le cas du chêne sessile de Croix-Scaille, en 1990 (tout suite après l'apport d'engrais), l'effet de l'amendement n'a eu un effet positif que pour CaSO₄ qui pourrait avoir un effet plus rapide sur la croissance des racines fines en profondeur (Bakker, 1998). Cependant, dans tous les cas globalement il y a une diminution de l'effet calcium sur la croissance radiale par rapport au témoin au cours du temps (voir Figure 4 p. 31). Dans le cas de Darney et les Hospices, l'effet positif du traitement concernant Ca en conditions du déficit hydrique se présente même après 23 et 15 ans après la date de fertilisation respectivement. Cette interprétation reste prudente car il y a des aspects importants qui n'ont pas pu être pris en compte dans le modèle mixte mais qui peuvent influencer la croissance des arbres comme les traitements sylvicoles (avec différentes intensités et fréquences mal renseignées par les gestionnaires dans la plupart des dispositifs étudiés). De plus, il faut garder à l'esprit le fait que la méthode d'analyse des données mise en œuvre ne prend pas explicitement en compte l'âge des arbres. Les effets âgés ont bien été éliminés au moment de la standardisation arbre par arbre cependant, les traitements pourraient affecter de manière différente les arbres jeunes et les arbres âgés. Ainsi, l'effet sur la croissance radiale (quand il y a une augmentation du déficit hydrique) des modalités de traitement concernant le calcium pour le hêtre de Darney (119 ans en moyenne à la date de fertilisation) et Fougères (61 ans en moyenne à la date de fertilisation) est significatif seulement pour le hêtre de Darney. Il semblerait donc que l'effet du traitement diffère selon l'âge du peuplement mais il peut être lié aussi à des conditions locales de station, de climat et des conditions des essais de fertilisation (différentes doses).

4.2.3. EFFET DE LA FERTILISATION OU AMENDEMENT SUR LA CROISSANCE DE PEUPELEMENTS JEUNES ET ADULTES EN CONDITIONS DE DEFICIT HYDRIQUE

L'effet de l'apport de la fertilisation ou amendement sur la croissance radiale des peuplements jeunes (avant la fructification) ou âgés (suite à la fructification) varie car il y a un phénomène de transfert de minéraux à partir de cernes anciens dans le cas des arbres adultes (Bonneau, 1995; Dambrine et al., 1991). Cependant, cet effet sur le peuplement jeune ou adulte varie selon l'espèce et le site. Ainsi, les résultats de l'étude montrent que pour le chêne sessile de Croix-Scaille (40 ans en moyenne à la date d'amendement) l'amendement calcique améliore la croissance radiale dans des situations du déficit hydrique tandis que pour le chêne sessile de Bercé, l'effet des traitements

calciques sur la croissance radiale n'est pas significatif lors des déficits hydriques (e.g. 1976) même si l'âge moyen est comparable (38 ans à la date de fertilisation). De plus ces deux peuplements ne sont pas encore capables de produire des fruits. Ces comportements contrastés pourraient être expliqués par les modalités de traitement qui ne sont pas les mêmes (CaSO_4 , CaMg , CaCO_3 pour Croix-Scaille, et NPKCa1 et NCa pour Bercé). Dans le cas du hêtre de Darney (119 ans en moyen à la date de fertilisation) et de Fougères (61 ans en moyen à la date de fertilisation), peuplements capables de produire de fruits, l'effet des traitements concernant le calcium (quand il y a une augmentation du déficit hydrique) n'est significatif que pour Darney où les peuplements sont plus âgés qu'à Fougères. Il semblerait donc que l'effet de la fertilisation sur la croissance dans des conditions de déficit hydrique puisse varier selon l'âge, l'espèce, le site et le type de fertilisation.

D'ailleurs, l'effet de la fertilisation sur la croissance du peuplement du hêtre de Darney et de Fougères n'est pas le même pour ces deux sites quand il y a déficit hydrique. Une possible explication est liée au fait que la fertilisation pourrait stimuler d'autres fonctions que la croissance radiale. En effet, Le Tacon et Oswald (1977) ont montré que l'apport surtout d'azote et, à degré moindre, de phosphore a un effet considérable sur la fructification pour le hêtre de Fougères. C'est identique pour le hêtre de Darney où la fertilisation type NP semble la meilleur. Cependant, ces résultats ont été décrits pour l'année 1973 où il n'y avait pas de déficit hydrique. L'absence d'effet de la fertilisation au phosphore et à l'azote sur la croissance radiale dans le cas du hêtre de Darney et Fougères pourrait être liée à une allocation vers la fructification au détriment de la croissance radiale dans des situations de déficit hydrique.

4.3. DISCUSSION DE LA METHODE D'ETUDE

4.3.1. METHODE DE STANDARDISATION ARBRE PAR ARBRE

Le calcul de l'indice de croissance nécessite une standardisation pour éliminer les effets exprimés à basse fréquence comme l'âge (voir point 2.2.2.1 p. 16) et garder les effets à haute fréquence comme l'effet annuel du climat : c'est celui qui nous intéresse pour le mettre en relation avec la croissance radiale annuelle. Si la méthode de standardisation « *Cubic Spline* » arbre par arbre est la méthode classique, très utilisée dans le champ de la dendrochronologie, elle reste critiquable car elle s'applique sur des données de séries chronologiques d'un individu. Dans ce cas, le biais de la courbe *spline* peut être créé par des raisons statistiques où une observation n'est pas nécessairement la valeur réelle de l'objet d'étude, en raison d'erreurs de mesure. De plus, la standardisation (visant à éliminer des effets à basse fréquence) transforme les valeurs réelles où rien n'assure que les données résultantes sont exactement les données à haute fréquence requis pour l'étude. Ainsi, d'autres méthodes d'analyse chronologiques ont été proposées, comme celle de Van der Perre et al. (2012) où au début de l'étude, ils travaillent avec toutes les données de surface terrière calculées à partir de largeur de cerne et puis d'autres méthodes de corrections de données sont utilisées (pour récupérer les valeurs à haute fréquence et les mettre en relation avec l'indice de sécheresse et la croissance radiale).

Une autre méthode d'analyse pour répondre à notre question de recherche est l'utilisation du modèle bayésien mise en pratique récemment dans les études dendrochronologiques (Guin, 2011) qui mettent en relation la croissance radiale et les données climatiques, où la démarche consiste à utiliser les données brutes, sans passer par le processus de standardisation individuelle. Cependant, ce modèle est principalement utilisé dans l'analyse des processus écologiques et les résultats indiquent l'évolution des effets des paramètres sans donner de valeurs de significativité. Enfin, bien que le modèle bayésien puisse être une alternative séduisante pour répondre à notre question d'étude, la méthode « *Cubic Spline* » utilisée dans l'étude est robuste car l'étude comporte un fort nombre d'observations par site élevé.

4.3.2. METHODE D'AJUSTEMENT

Les résultats de l'analyse de variance de la largeur de cerne et de l'indice de croissance pour les 10 ans précédant la fertilisation montrent une différence significative entre le témoin et au moins une

modalité de traitement pour six et cinq sites respectivement (voir Tableau 4 p. 23). De plus, ces différences sont plus significatives pour l'indice de croissance que pour la largeur de cerne. Ceci pourrait suggérer un possible biais (qui peut s'exprimer différemment au cours de la série chronologique) créé par la standardisation effectuée sur la largeur de cerne (c'est un des points critiquables de la standardisation). Cependant, l'ajustement effectué sur l'indice de croissance ou la largeur de cerne n'affecte pas la question du fond de l'étude car il a été effectué de manière systématique au long de la série chronologique pour chaque pour chaque traitement.

Le test post-hoc de Tukey sur l'indice de croissance montre que pour le site de Croix-Scaille, Darney, Fougères et Mortagne le témoin est différent d'au moins une modalité de traitement. Il a été donc nécessaire d'utiliser la méthode d'ajustement qui a été appliqué de manière systématique pour tous les sites étudiés. Cependant, il est important de signaler que l'ajustement de l'indice de croissance peut aussi créer des biais au long de la série chronologique. Ainsi, pour le site Mortagne (Figure 1 p. 24), l'ajustement au long de la série chronologique (basé sur la correction de 10 ans précédant la fertilisation) augmente la différence d'indice de croissance sur des années précédant la période de correction. Pour le site de Bercé (Figure 1 p. 24), le biais pourrait apparaître pour les années qui dépassent les 20 ans après la fertilisation. Une perspective serait de tester (sur les mêmes données) une correction basée non pas sur la valeur moyenne pendant les 10 ans qui précèdent mais sur la pente de la courbe (i.e. la dynamique de croissance), comme elle se voit parfois (Barbaroux, 1997), qui produit aussi des différences mais qui pourrait améliorer l'ajustement à long terme.

5. CONCLUSION

Les résultats de l'étude montrent que l'effet de la fertilisation sur la croissance radiale dans des conditions de déficit hydrique varie selon le site et le type de traitement. L'effet des modalités CaCO_3 , CaSO_4 et CaMg pour le chêne sessile de Croix-Scaille ; Ca, NPKCa1 et NPKCa pour le hêtre de Darney ; Ca pour le sapin de Mortagne ; PCa, NCa et NP pour le sapin des Hospices ; et Ca, P, PCa et N pour l'épicéa de Croix-Scaille. Dans tous les cas, d'après les résultats du modèle mixte testé dans l'étude, l'effet de ces modalités diminue quand le déficit hydrique augmente.

Nous résultats montrent que l'effet de l'azote (lors qu'il est apporté seul) sur la croissance radiale de l'épicéa (Croix-Scaille), le hêtre (Fougères) et le sapin (Hospices) n'est pas significatif dans des conditions de déficit hydrique mais il est globalement dépressif. Bien que l'apport d'azote n'améliore pas la croissance radiale, il pourrait être lié à l'amélioration de la quantité des fruits produits (Le Tacon et Oswald, 1977).

La fertilisation ou amendement dans les sites de Croix-Scaille (épicéa et chêne) et les Hospices (sapin) a été réalisée surtout avec l'objectif d'améliorer la production dans des peuplements sur sol pauvres. Les amendements calciques améliorent la minéralisation du sol et la croissance en surface et en profondeur des racines fines, importantes pour l'absorption d'eau dans des conditions de déficit hydrique. Dans le cas du site de Darney et de Fougères (hêtre), la fertilisation a été réalisée surtout pour améliorer la croissance dans des peuplements adultes. Bien que dans les deux cas il y ait une amélioration de la croissance radiale avec la fertilisation (sauf avec l'azote pour Fougères), les résultats du modèle mixte testé dans l'étude montre que la fertilisation phosphatée n'est pas significative dans des conditions de déficit hydrique. L'effet du phosphate peut être lié, comme dans le cas de l'azote, à la fructification des arbres laquelle est montrée sur ces peuplements mais quand il n'y a pas de déficit hydrique (Le Tacon et Oswald, 1977). Il serait donc intéressant de vérifier si l'effet de la fertilisation phosphatée favorise la fructification dans des conditions de sécheresse. La fertilisation pour le site de Bercé (chêne sessile) a été réalisée pour améliorer la croissance d'un peuplement jeune. Ainsi, d'après les résultats de l'étude, bien que la fertilisation ait un effet significatif sur la croissance radiale quand il n'y a pas de déficit hydrique, l'effet n'est pas significatif quand le déficit hydrique augmente même si la fertilisation concerne le calcium (type Ca). Dans le cas des Vosges (sapin), la fertilisation a été réalisée pour améliorer la croissance dans des conditions de dépérissement. La modalité calcium (Ca) du site Mortagne est la seule qui ait un effet significatif sur la croissance radiale même si d'autres modalités de fertilisation impliquent le calcium.

Il est important donc de signaler que d'après l'étude de Bakker (1998), il semblerait que la fertilisation concernant le calcium soit importante pour améliorer la croissance radiale des arbres dans des conditions de sécheresse. Cependant, il semble que l'effet de cette modalité varie énormément selon l'espèce, l'âge, le type de combinaison avec d'autres éléments nutritifs et des variations locales du sol, le climat et le traitement sylvicole.

Il est difficile de généraliser les résultats obtenus car chaque site et chaque essence a une réponse (mesurée par la croissance radiale) au traitement dans des conditions de sécheresse qui diffère en fréquence, intensité et durée. L'effet de fertilisation peut améliorer (modalité concernant le calcium) ou peut être dépressif (l'azote tout seul) sur la croissance radiale. Ainsi, la fertilisation pourrait améliorer la croissance radiale dans des conditions défavorables selon le cadre de figure (type de sol, d'espèce, de traitement...). Enfin, d'après les résultats de l'étude, l'effet de la fertilisation sur la croissance radiale (dans des conditions de déficit hydrique), peut s'exprimer dès l'apport d'engrais (e.g. le sapin des Hospices et de Mortagne) ou peut prendre quelques années (e.g. le chêne sessile de Croix-Scaille et le hêtre de Darney). Dans ce sens, l'effet de la fertilisation/amendement peut aussi favoriser la croissance radiale pendant une courte ou longue durée qui varie selon le site et l'espèce. Ainsi, pour le hêtre du Darney et le sapin des Hospices, l'effet de la fertilisation (Ca, NPKCa1 et NPKCa pour Darney et PCa, NCa et NP pour les

Hospices) peut avoir un effet positif sur la croissance radiale (quand il y a déficit hydrique) même après 23 et 15 ans respectivement.

Enfin, nous encourageons à mettre en place des études qui considèrent les effets des différentes modalités calciques et azotées et leur relation avec le transfert de l'eau dans la plante sur non seulement la croissance radiale mais aussi sur d'autres fonctions comme la fructification. Dans ce sens, il est importante élargir les propositions de recherche sur le bilan de carbone dans l'arbre.

6. REFERENCES

- Aber J.D., Nadelhoffer K.J., Steudler P., Melillo J.M., 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 39 (6), pp. 378–286.
- Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H. (Ted), Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259 (4), pp. 660-684.
- Amponsah I.G., Lieffers V.J., Comeau P.G., Brockley R.P., 2004. Growth response and sapwood hydraulic properties of young lodgepole pine following repeated fertilization. *Tree physiology*, 24 (10), pp. 1099-1108.
- Badeau V., Bréda N., 2008. Modélisation du bilan hydrique: l'étape clé de la détermination des paramètres et variables d'entrée. *Rendez-vous Techniques*, (4), pp. 11-114.
- Bakker M., 1998. *Effet des amendements calciques sur les racines de chêne (Quercus petraea et robur): conséquences des changements dans la rhizosphère*. Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Nancy (France), 287 p.
- Bakker M.R., Nys C., Picard J.F., 1999. The effects of liming and gypsum applications on a sessile oak (*Quercus petraea* (M.) Liebl.) stand at La Croix-Scaille (French Ardennes) I. Site characteristics, soil chemistry and aerial biomass. *Plant and Soil*, 206 (1), pp. 99-108.
- Barbaroux C., 1997. *Dendrochronologie et modélisation: Deux approches complémentaires pour comprendre la croissance des forêts sur le long terme*. Rapport de DEA. Paris, Université de Paris-Sud XI, p. 36.
- Becker M., 1992. Radial growth of mature silver firs (*Abies alba* Mill.) fertilized in 1969. Interaction of climate and competition. *Lundqua Report*, 34, pp. 17-21.
- Becker M., Lévy G., Lefèvre Y., 1996. Radial growth of mature pedunculate and sessile oaks in response to drainage, fertilization and weeding on acid pseudogleys soils. *Annales des Sciences Forestières*, 53 (2-3), pp. 585-594.
- Bigler C., Braker O.U., Bugmann H., Dobbertin M., Rigling A., 2006. Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems*, 9 (3), pp. 330-343.
- Bonneau M., 1995. *Fertilisation des forêts dans les pays tempérés: Théorie, bases du diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales*. Nancy (France), Ecole Nationale du Génie rurale, des Eaux et des Forêts de Nancy, 386 p.
- Bonneau M., 1972. Quelques résultats d'essai de fertilisation sur Epicéa dans le Massif Central. *Revue Forestière Française*, 24 (5), pp. 354-363.
- Bonneau M., Landmann G., Adrian M., 1992. La fertilisation comme remède au dépérissement des forêts en sol acide: essais dans les Vosges. *Revue Forestière Française*, 44 (3), pp. 207-223.

- Bréda N., Badeau V., 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Comptes Rendus Geoscience*, 340 (9–10), pp. 651–662.
- Bréda N., Granier A., Aussenac G., 2004. La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années: analyses écophysiologicals et influence sur les arbres forestiers. *Revue Forestière Française*, 56 (2), pp. 109–131.
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63 (6), pp. 625–644.
- Bréda N., Lefèvre Y., Badeau V., 2002. Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. *La Houille Blanche*, (3), pp. 24–32.
- Bucci S.J., Scholz F.G., Goldstein G., Meinzer F.C., Franco A.C., Campanello P.I., Villalobos-Vega R., Bustamante M., Miralles-Wilhelm F., 2006. *Nutrient availability constrains the hydraulic architecture and water relations of savannab trees*. Disponible sur Internet: <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/29745>.
- Cook E.R., Peters K., 1997. Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene*, 7 (3), pp. 361–370.
- Cook E.R., Peters K., 1981. The Smoothing Spline: A New Approach to Standardizing Forest Interior Tree-Ring Width Series for Dendroclimatic Studies. *Tree Ring Bulletin*, (41), pp. 45–56.
- Dambrine E., Legoaster S., Ranger J., 1991. Growth and mineral-nutrition of a Spruce stand on poor soil .2. root uptake and translocation of minerals during growth. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, 12 (6), pp. 791–808.
- Demchik M.C., Sharpe W.E., 2000. The effect of soil nutrition, soil acidity and drought on northern red oak (*Quercus rubra* L.) growth and nutrition on Pennsylvania sites with high and low red oak mortality. *Forest Ecology and Management*, 136 (1–3), pp. 199–207.
- Dobbertin M., Rigling A., 2006. Pine mistletoe (*Viscum album* ssp *austriacum*) contributes to Scots pine (*Pinus sylvestris*) mortality in the Rhone valley of Switzerland. *Forest Pathology*, 36 (5), pp. 309–322.
- Fehlen N., 1992. *Etude dendroécologique d'une plantation d'épicéa commun (Picea abies (L.) Karst.) adulte fertilisée dans les Ardennes*. Rapport de DEA. Nancy, Université de Nancy I, p. 21.
- Fehlen N., Picard J.-F., 1994. Influence de la fertilisation sur la végétation spontanée et la croissance radiale de l'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst) dans une plantation adulte des Ardennes françaises. *Annales des Sciences Forestières*, 51 (6), pp. 569–580.
- Garbaye J., Leroy P., 1974. Influence de la fertilisation sur la production de glands en forêt de Bercé et forêt de Boulogne. *Revue Forestière Française*, 26 (3), pp. 222–228.
- Garbaye J., Leroy P., Oswald H., 1974. Premiers résultats de cinq années de fertilisation sur jaunes peuplements de chêne en forêt de Bercé. *Revue Forestière Française*, 26 (1), pp. 51–58.
- Gelpe J., Lefrou G., 1986. Essai de fertilisation sur Pin maritime à Mimizan (Landes). Résultats après la 26ème année. *Revue Forestière Française*, 38 (4), pp. 394–400.

- Genet H., 2009. *Effets du vieillissement et de la fertilisation minérale sur l'allocation du carbone à la croissance, le stockage de réserves et la reproduction chez le chêne et le hêtre*. Université Henri Poincaré Nancy I, Nancy, 237 p.
- Goldstein G., Bucci S.J., Scholz F.G., 2013. Why do trees adjust water relations and hydraulic architecture in response to nutrient availability? *Tree physiology*, 33 (3), pp. 238-240.
- Granier A., Badeau V., Breda N., 1995. Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue Forestière Française*, 67 (S), pp. 59-68.
- Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116 (2-3), pp. 269-283.
- Guin O., 2011. *Méthodes bayésiennes semi-paramétriques d'extraction et de sélection de variables dans le cadre de la dendroclimatologie, Semi-parametric Bayesian Methods for variables extraction and selection in a dendroclimatological context*. Electronic Thesis or Dissertation, Text, Image, Université Paris-Sud 11, Paris, 115 p.
- Guitton J.L., Bonneau M., Adrian M., 1988. Résultats de fertilisation minérale en région méditerranéenne. *Revue Forestière Française*, 60 (4), pp. 315-320.
- INRA, 2009. *Biljou - Modèle de Bilan Hydrique forestier*. Disponible sur Internet: <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=presente>.
- Jonard M., André F., Giot P., Weissen F., Van der Perre R., Ponette Q., 2010. Thirteen-year monitoring of liming and PK fertilization effects on tree vitality in Norway spruce and European beech stands. *European Journal of Forest Research*, 129 (6), pp. 1203-1211.
- Kauhanen H., Wallenius T., Kuuluvainen T., Aakala T., Mikkola K., 2008. Extensive mortality of spruce forests in Arkhangelsk Region: satellite image analysis. In: *International Conference*. Umeå, Sweden, FAO/IUFRO. Poster de Presentation, .
- Kessler J., Chambraud A., 1990. *La Météo de la France : Tous les climats localité par localité (Le Grand livre du mois)*. Lattès, 391 p.
- Körner C., Sarris D., Christodoulakis D., 2005. Long-term increase in climatic dryness in the East-Mediterranean as evidenced for the island of Samos. *Regional Environmental Change*, 5 (1), pp. 27-36.
- Landmann G., Bonneau M., Adrian M., 1987. Le dépérissement du Sapin pectiné et de l'Epicéa commun dans le massif vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements? *Revue Forestière Française*, 39 (1), pp. 5-11.
- Landmann G., Dreyer E., 2006. Impacts of Drought and Heat on Forests: Synthesis of Available Knowledge, with Emphasis on the 2003 Event in Europe. *Annals of Forest Science*, 3 (6), pp. 567-652.
- Lebourgeois F., 1991. *Modifications observées à la suite d'une fertilisation dans diverses sapinières dépérissantes des Vosges: Etude phytoécologique et dendrochronologique*. Rapport de DEA. Paris, Université d'Orsay, p. 47.
- Lebourgeois F., Becker M., Bonneau M., 1993. Influence d'une fertilisation minérale sur la croissance radiale de sapinières dépérissantes dans les Vosges. *Revue Forestière Française*, 45 (6), pp. 639-650.

- Lebourgeois F., Pierrat J.-C., Goldfroy P., Ulrich E., Cecchini S., Lanier M., 2006. Phénologie des peuplements du réseau RENECOFOR: variabilité entre espèces et dans l'espèce, et déterminisme climatique. *Rendez-vous Techniques*, (13), pp. 23-26.
- Lovelock C.E., Ball M.C., Choat B., Engelbrecht B.M.J., Holbrook N.M., Feller I.C., 2006. Linking physiological processes with mangrove forest structure: phosphorus deficiency limits canopy development, hydraulic conductivity and photosynthetic carbon gain in dwarf *Rhizophora mangle*. *Plant, cell & environment*, 29 (5), pp. 793-802.
- Lovelock C.E., Feller I.C., Mckee K.L., Engelbrecht B.M.J., Ball M.C., 2004. The effect of nutrient enrichment on growth, photosynthesis and hydraulic conductance of dwarf mangroves in Panama. *Functional Ecology*, 18 (1), pp. 25-33.
- Mandre M., Pärn H., Ots K., 2006. Short-term effects of wood ash on the soil and the lignin concentration and growth of *Pinus sylvestris* L. *Forest Ecology and Management*, 223 (1-3), pp. 349-357.
- Marsalle S., 1996. *Etude dendroécologique d'un peuplement de hêtre (Fagus sylvatica L.) fertilisé dans l'ouest de la France (Forêt de Fougères)*. Rapport de DEA. Nancy, Université Henri-Poincaré, Nancy I, p. 13.
- Martinez-Vilalta J., Pinol J., 2002. Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. *Forest Ecology and Management*, 161 (1-3), pp. 247-256.
- Nys C., 1987. *Fonctionnement du sol d'un écosystème forestier: conséquences des enrésinements*. Thèse doctorat, Université de Nancy I, France, 207 p.
- Nys C., Bonischot R., Gelhaye D., 1985. Réponse d'un peuplement de Pin laricio de Corse (*Pinus nigra* espèces laricio) à la fertilisation en Sologne. *Revue Forestière Française*, 37 (6), pp. 482-486.
- Pasho E., Camarero J.J., de Luis M., Vicente-Serrano S.M., 2011. Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (12), pp. 1800-1811.
- Pasho E., Julio Camarero J., Vicente-Serrano S.M., 2012. Climatic impacts and drought control of radial growth and seasonal wood formation in *Pinus halepensis*. *Trees-Structure and Function*, 26 (6), pp. 1875-1886.
- Peiffer M., Le Goff N., Nys C., Ottorini J.-M., Granier A., 2005. Bilan d'eau, de carbone et croissances comparées de deux hêtraies de plaine. *Revue Forestière Française*, 57 (2), pp. 201-216.
- Van der Perre R., Jonard M., André F., Nys C., Legout A., Ponette Q., 2012. Liming effect on radial growth depends on time since application and on climate in Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 281, pp. 59-67.
- Phillips N., Bergh J., Oren R., Linder S., 2001. Effects of nutrition and soil water availability on water use in a Norway spruce stand. *Tree Physiology*, 21 (12-13), pp. 851-860.
- Picard J.F., Becker M., Nys N., Dupouey J.L., 1999. Evolution à moyen terme de la croissance radiale de l'épicéa et du hêtre en relation avec la fertilisation/amendement: analyse dendroécologique. *Revue Forestière Française*, 51 (2), pp. 197-218.

- Ranger J., Nys C., Ranger D., 1981. Etude comparative de deux écosystèmes forestiers feuillus et résineux des Ardennes primaires françaises I. - Biomasse aérienne du taillis-sous-futaie. *Annals of Forest Science*, 38 (2), pp. 259-282.
- Samuelson L.J., Farris M.G., Stokes T.A., Coleman M.D., 2008. Fertilization but not irrigation influences hydraulic traits in plantation-grown loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 255 (8-9), pp. 3331-3339.
- Sánchez-Salguero R., Navarro-Cerrillo R.M., Swetnam T.W., Zavala M.A., 2012. Is drought the main decline factor at the rear edge of Europe? The case of southern Iberian pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 271, pp. 158-169.
- Siwecki R., Ufnalski K., 1998. Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *European Journal of Forest Pathology*, 28 (2), pp. 99-112.
- Solberg S., 2004. Summer drought: a driver for crown condition and mortality of Norway spruce in Norway. *Forest Pathology*, 34 (2), pp. 93-104.
- Le Tacon F., 1970. La fertilisation des peuplements adultes. *Revue Forestière Française*, 22 (3), pp. 379-389.
- Le Tacon F., 1969. Un grand chercheur forestier du XVIIIe siècle Georges Louis LECLERC, comte de Buffon. *Revue Forestière Française*, 21 (4), pp. 273-280.
- Le Tacon F., Oswald H., 1977. Influence de la fertilisation minérale sur la fructification du Hêtre (*Fagus silvatica*). *Annales des Sciences Forestières*, 34 (2), pp. 89-109.
- Tillier P., 1995. *Effets à long terme d'amendements minéraux sur l'écosystème hêtraie de plaine : interactions faune-humus*. Rennes, Rennes: Station biologique de Paimpont-Laboratoire d'écologie du sol, 36 p. Disponible sur Internet: http://infodoc.agroparistech.fr/index.php?lvl=notice_display&id=91266.
- Tsopelas P., Angelopoulos A., Economou A., Soulioti N., 2004. Mistletoe (*Viscum album*) in the fir forest of Mount Parnis, Greece. *Forest Ecology and Management*, 202 (1-3), pp. 59-65.
- Tyree M.T., Sperry J.S., 1988. Do Woody Plants Operate Near the Point of Catastrophic Xylem Dysfunction Caused by Dynamic Water Stress? Answers from a Model. *Plant Physiology*, 88 (3), pp. 574-580.
- Vennetier M., Vila B., Liang E.-Y., Guibal F., Ripert C., Chandioix O., 2005. Impact du changement climatique sur la productivité forestière et le déplacement d'une limite bioclimatique en région méditerranéenne française. *Ingénieries*, (44), pp. 49-61.
- Vertui F., Tagliaferro F., 1998. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) die-back by unknown causes in the Aosta Valley, Italy. *Chemosphere*, 36 (4-5), pp. 1061-1065.

Site internet consulté :

- Biljou© : <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>
- Météo France : <http://france.meteofrance.com/>

7. LISTE DES ABREVIATIONS

- ✓ INRA : Institut national de recherche agronomique
- ✓ RENECOFOR : Réseaux national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers
- ✓ ONF : Office national de forêt
- ✓ EEF : Laboratoire d'écologie et écophysologie
- ✓ BILJOU : Modèle de bilan hydrique journalier forestier
- ✓ ETP : Evapotranspiration potentielle
- ✓ ETR : Evapotranspiration réelle
- ✓ LAI : *Leaf area index*
- ✓ PFP : Point de flétrissement permanent
- ✓ CC : Capacité du champ
- ✓ RU : Réserve utile d'eau
- ✓ AIC : *Akaike information criterion*
- ✓ SAS : *Statistical Analysis System*

8. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Dose et forme d'apport des engrais de fertilisation ou amendement pour les parcelles traitées selon le site.....	16
Tableau 2 : Paramètres du peuplement forestier (LAI et jour de débourrement) et du sol utilisés dans le modèle BILJOU©.....	20
Tableau 3 : Périodes de l'indice de déficit hydrique annuel I_s par essence et par site.	22
Tableau 4 : Analyse de variance testant les effets du traitement, du bloc et de leur interaction sur la croissance moyenne des dix années précédant la fertilisation. L'analyse a été réalisée en considérant (i) la largeur de cerne brute (L_c) ou (ii) l'indice de croissance (I_c) comme variables à expliquer. Les valeurs de F accompagnées de la p-value associée sont présentées.....	25
Tableau 5 : Date de début et fin de période de calcul de l'indice déficit hydrique sélectionnée par essence et par site.....	28
Tableau 6 : Analyse de variance entre traitements de l'indice de croissance I_c après la fertilisation pour les années sèches où le contrôle est différente pour d'au moins un type de traitement. Les valeurs de F accompagnées sont présentées. La date de la fin de la période d'investigation se montre comme Fin période.	30
Tableau 7 : Effets du traitement (Trait), de l'indice de déficit hydrique (I_s) et de leur interaction sur l'indice de croissance (I_c). Les périodes de I_s varient entre sites ainsi : azur : 1 juin-31 juil ; orange : 2 juil.-31 août ; vert : 2 juil.-18 oct; jaune : 2 juil.-23 oct; violet : 1 mars-1 juin. Les valeurs de F accompagnées du p-value associé sont présentées.....	31
Tableau 8 : Effet de chaque modalité de traitement (Trait) en interaction avec l'indice de déficit hydrique (I_s) sur l'indice de croissance (I_c) par rapport au témoin. Les valeurs de F accompagnées de la p-value associée sont présentées.....	32
Tableau 9 : Synthèse de résultats. En gris se présente l'effet du traitement (Trait quand $I_s=0$) et de l'interaction entre l'indice de déficit hydrique (I_s) et le traitement d'après le modèle mixte. Les couleurs orange, jaune, bleu et vert présentent l'effet du traitement sur la croissance radiale les années 1996, 1976, 1989 et 1987 respectivement quand I_s est maximum, d'après l'analyse de variance après la date de fertilisation/amendement. * : effet significatif du traitement ; ns : effet non significatif du traitement ; ↓ : effet négatif de l'interaction.....	35

9. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation des facteurs qui affectent les fonctions de l'arbre. tiré de Badeau et Bréda, 2008.....	9
Figure 2 : Comparaison de l'indice de croissance (I_c) ajusté et non au long de la série chronologique et basé sur la correction de 10 ans précédant la fertilisation, pour les sites de Mortagne et Bercé. La période de correction est représentée par les pointillés verticaux.....	26
Figure 3 : Evolution du gain de croissance de chaque modalité de fertilisation par rapport au témoin pour Bercé, Croix-Scaille-Chêne, Darney, Fougères, Grendelbruch, Mortagne, Russ, Vologne, Hospices, Croix-Scaille-Epicéa où les barres d'erreur représentent les erreurs standards de la moyenne (n égal à 13, 18, 123, 76, 40, 45, 40, 33, 61, 140 respectivement). La date de fertilisation est représentée par les pointillés verticaux.....	28
Figure 4 : Distribution de l'indice de déficit hydrique par année et par site.....	29
Figure 5 : Distribution d'années sèches selon l'indice de croissance (I_c) et l'indice de déficit hydrique (I_d) par traitement et pour les sites où l'interaction I_s *Traitement est significative d'après le modèle mixte.....	33

10. ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

10.1. Annexe 1 : Résumé des caractéristiques du peuplement, de l'échantillonnage et des placettes de chaque site	57
10.2. Annexe 2 : Représentation de parcelles et placettes de quatre sites	59
10.3. Annexe 3 : Nombre d'observations et d'arbres par traitement et par site.....	68
10.4. Annexe 4 : Description du profil du sol pour le site de Croix-Scaille-Chêne.....	69
10.5. Annexe 5 : Description du profil du sol pour le site de Bercé.....	70
10.6. Annexe 6 : Description du profil du sol pour le site des Potées.....	71
10.7. Annexe 7 : Description du profil de sol pour le site de Fougères	72
10.8. Annexe 8 : Description du profil de sol pour le site de Darney.....	73
10.9. Annexe 9 : Description du profil de sol pour le site des Hospices.....	73
10.10. Annexe 10 : Description du profil de sol pour le site des Vosges.....	74
10.11. Annexe 11 : Description du profil de sol pour le site de Croix-Scaille-Epicéa.....	75
10.12. Annexe 12 : Les périodes des données climatiques pour les station météorologique choisissés.....	77
10.13. Annexe 13 : Représentation graphique de la standardisation arbre par arbre	77
10.14. Annexe 14 : Ajustement de l'indice de croissance au long de la série chronologique.....	78
10.15. Annexe 15 : Indice de déficit hydrique pour les années où il existe un effet d'au moins un essai de fertilisation/amendement sur la croissance radiale.....	82
10.16. Annexe 16 : Carte du déficit hydrique des années les plus sèches en France depuis 1952 ..	83

10.1. ANNEXE 1 : RESUME DES CARACTERISTIQUES DU PEUPEMENT, DE L'ECHANTILLONNAGE ET DES PLACETTES DE CHAQUE SITE

Essence	Nom du site	Âge moyen suppose à la date de fert./amed.	Âge moyen à la date de carottage	Type forêt	Type du sol	Type de trait	Date de fertilisation	Eclaircie	Echantillonnage	N° de traitements	N° de répétitions	N° de placettes	N° arbres	Date de carottage
Chêne sessile (<i>Quercus petraea</i>)	Bercé	38	75	Futaie	lessivé à pseudogley	Fertilisation	1970	Oui	5 arbres/placette	3	3	9	40	2007
	Croix-Scaille	42	48	Tailli sous futaie	Brun-acide	Amendement	1990	Non	plein	4	2	8	49	1997
Chêne peduncule (<i>Quercus peduncule</i>)	Les Potées	11	21	Futaie	Brun-acide	Fertilisation	1995	Non	15 arbres / placette	2	2	4	30	2007
Hêtre (<i>Fagus sylvatica</i>)	Darney	119	143	Futaie régulière	Brun-acide	Fertilisation	1972	Oui	Plein	6	4	24	670	1996
	Fougères	61	81	Futaie	Brun-acide	Fertilisation	1973	Oui	plein	5	4	20	327	1994
Sapin pectiné (<i>Abies alba</i>)	Vologne	91	96	Futaie	Brun-acide	Fertilisation	1985	non	Plein	5	2	40*	162	1990
	Mortagne	102	108										166	
	Grendelbruch	91	95										156	
	Russ	92	98	155										
	Hospices	98	117	Futaie régulière	Brun-acide	Fertilisation	1969	Non	plein	7	5	55**	431	1989
Epicéa (<i>Picea abies</i>)	Croix-Scaille	40	50	Futaie régulière	Brun-acide	Fertilisation	1981	Oui	plein	6	4	22***	702	1991

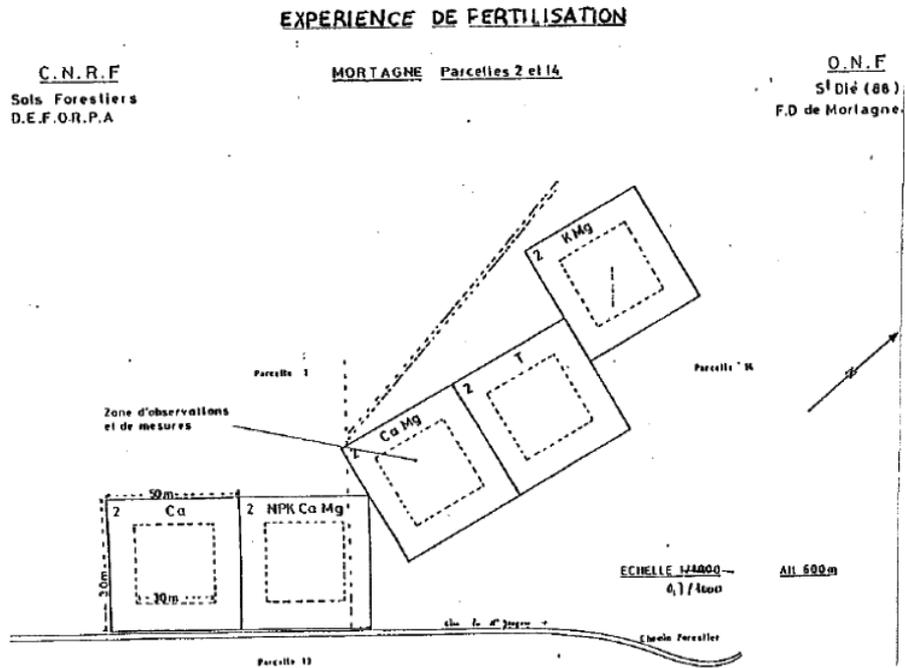
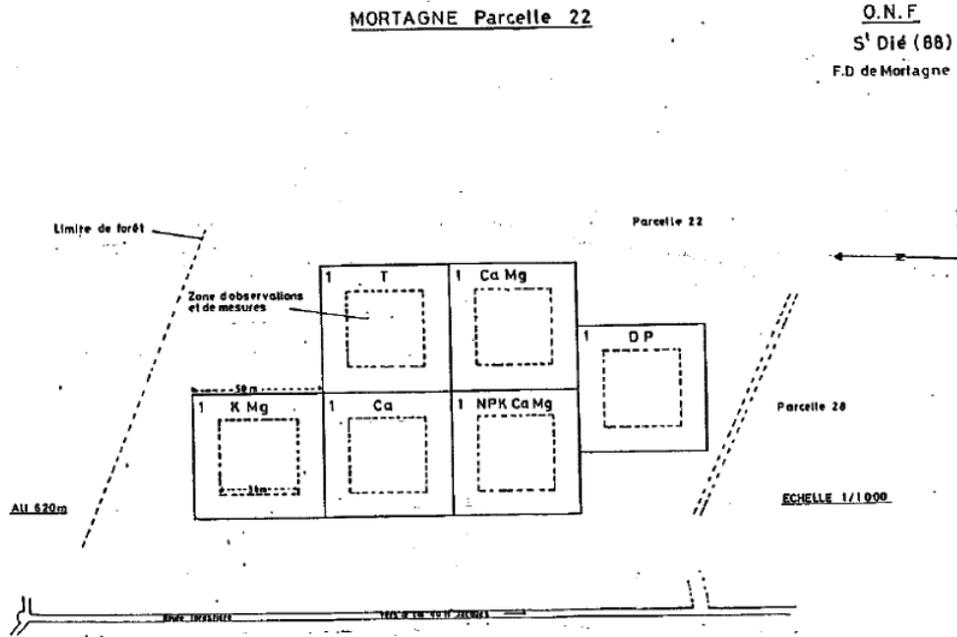
*: 40 placettes au total dont 10 par dispositif

** : 55 placettes au total dont 30 répétitions du témoin

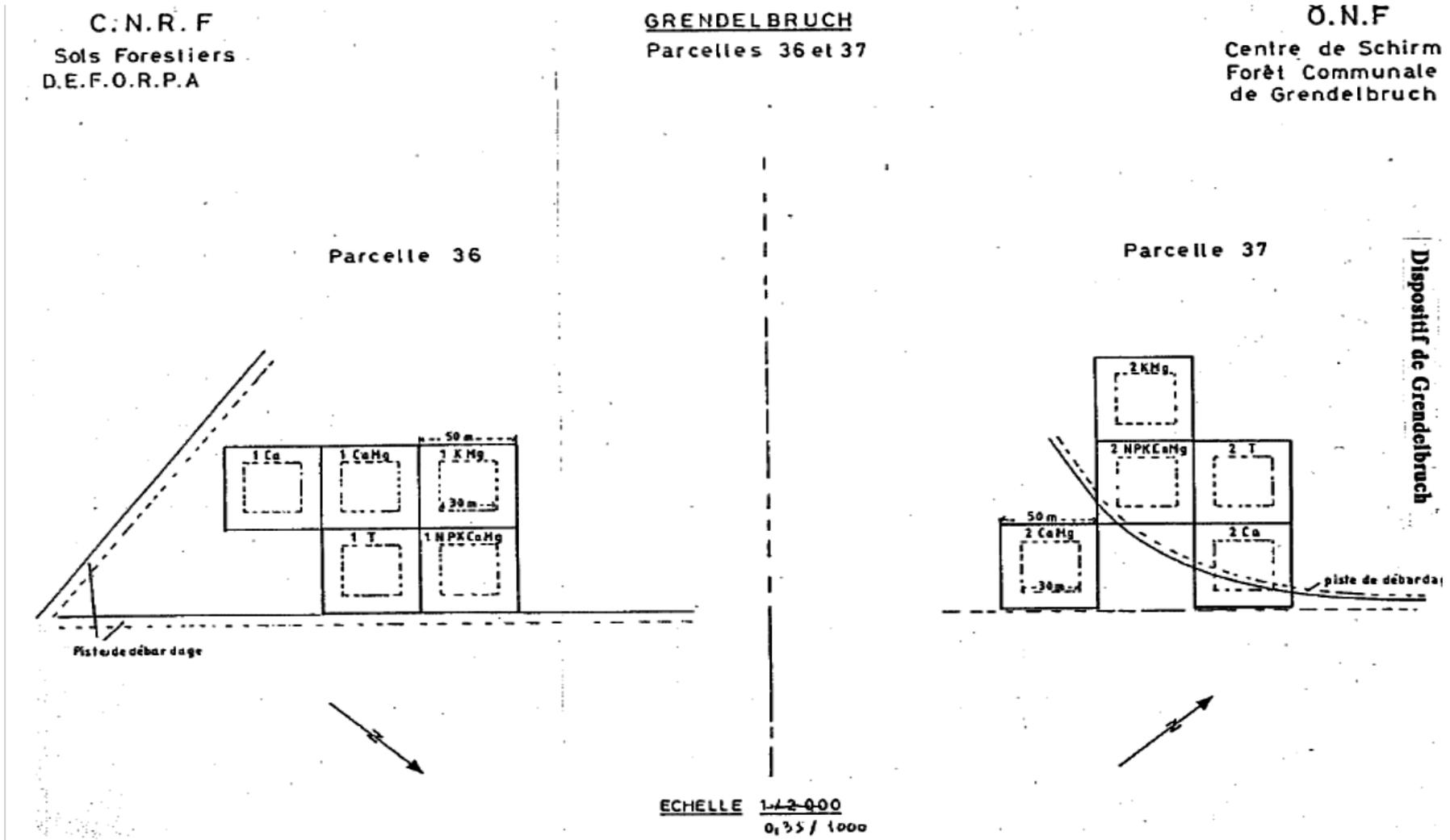
***: au début il y avait 24 placettes dont 2 supprimés

10.2. ANNEXE 2 : REPRESENTATION DE PARCELLES ET PLACETTES DE QUATRE SITES

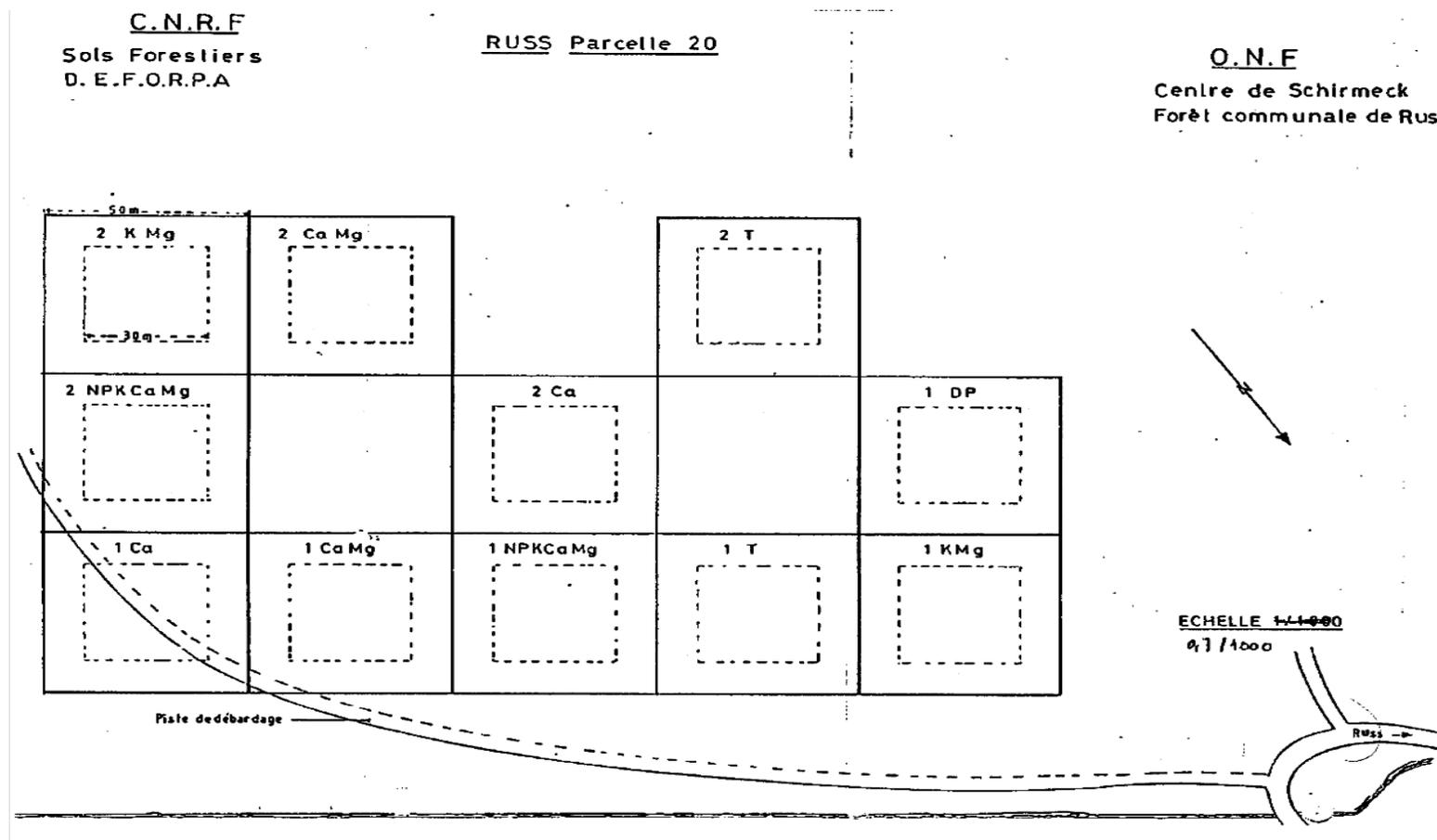
Précision : Dispositif de Mortagne



Précision : Dispositif de Grendelbruch



Précision : Dispositif de Russ

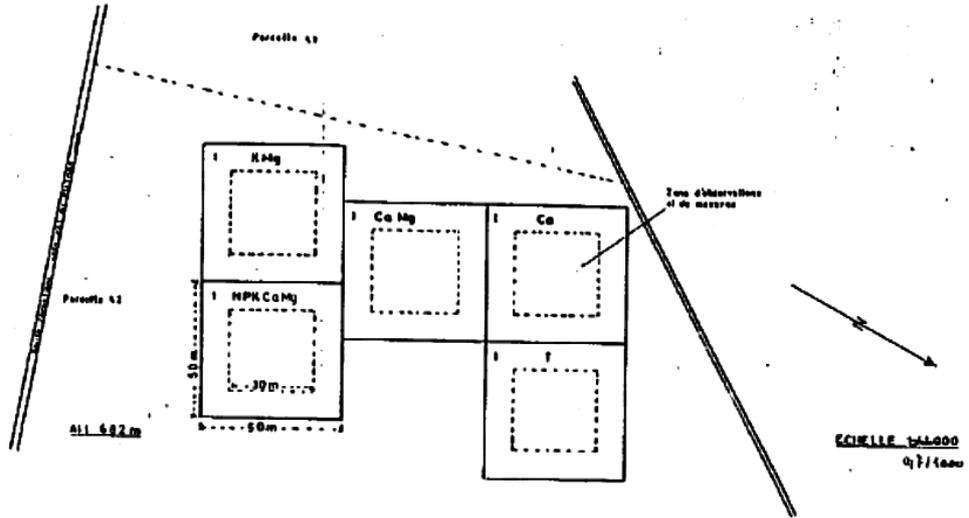


Précision : Dispositif de Vologne

C.N.R.F.
Sols Forestiers
D.E.F.O.R.P.A

VOLOGNE Parcelle 42

O.N.F.
S1014 (88)
F.O de Vologne

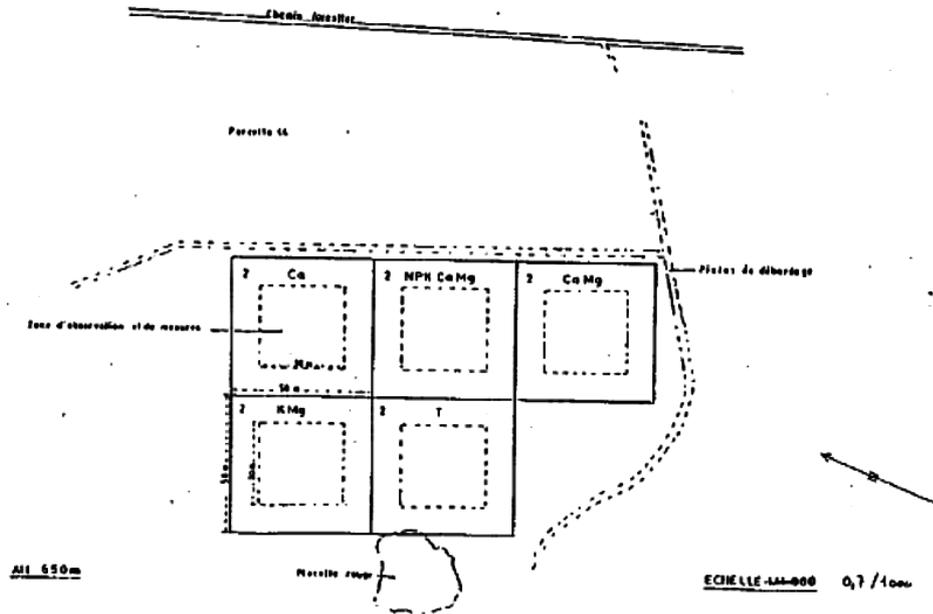


EXPERIENCE DE FERTILISATION

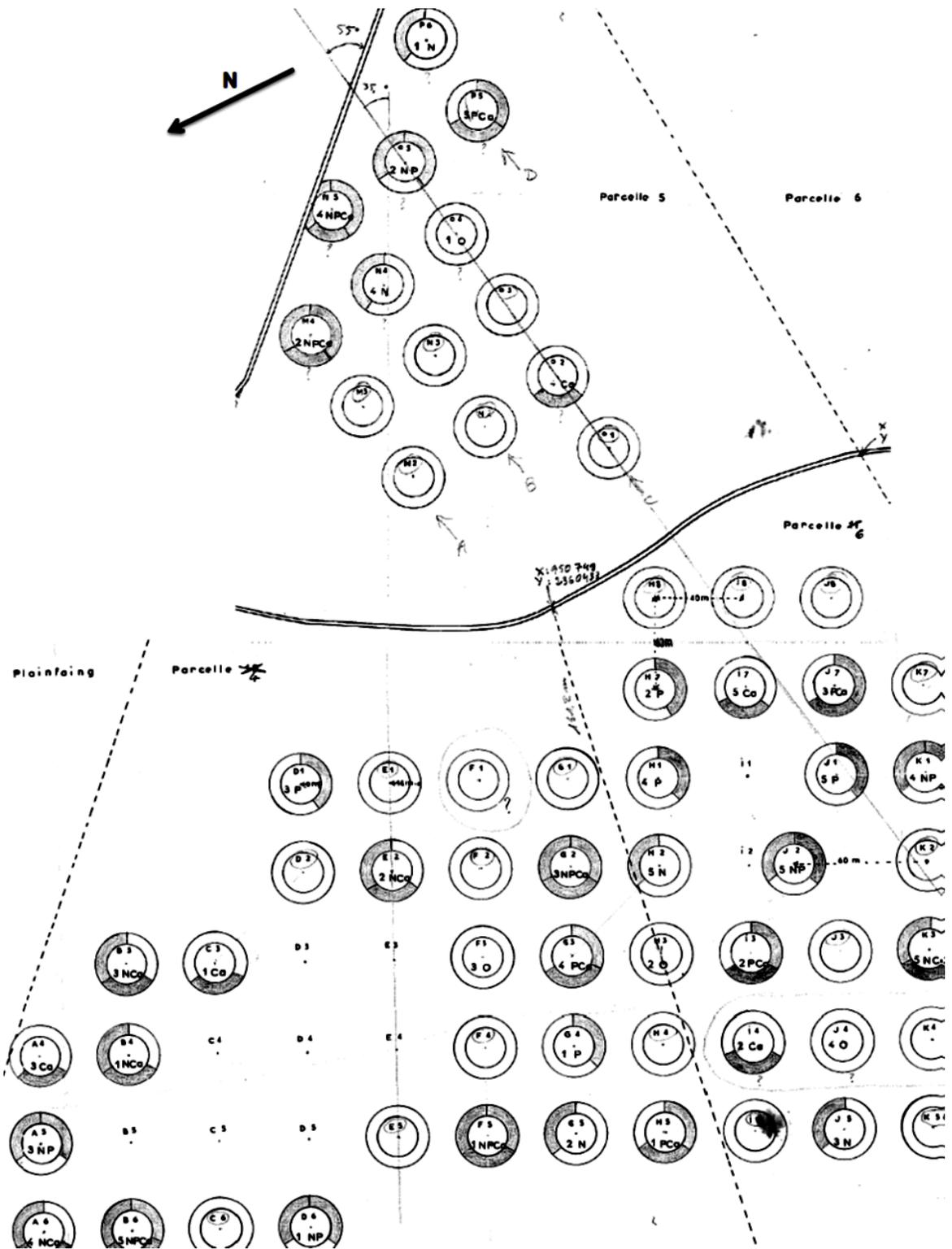
C.N.R.F.
Sols Forestiers
D.E.F.O.R.P.A

VOLOGNE Parcelle 44

O.N.F.
S1014 (88)
F.O de Vologne

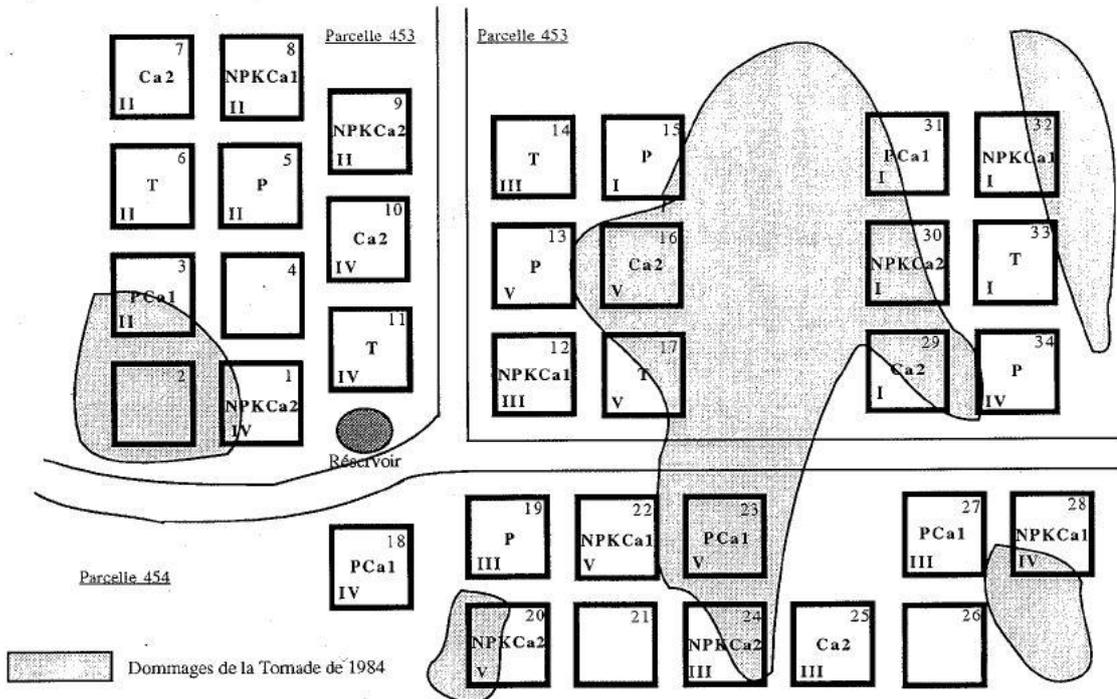


Précision : Dispositif des Hospices

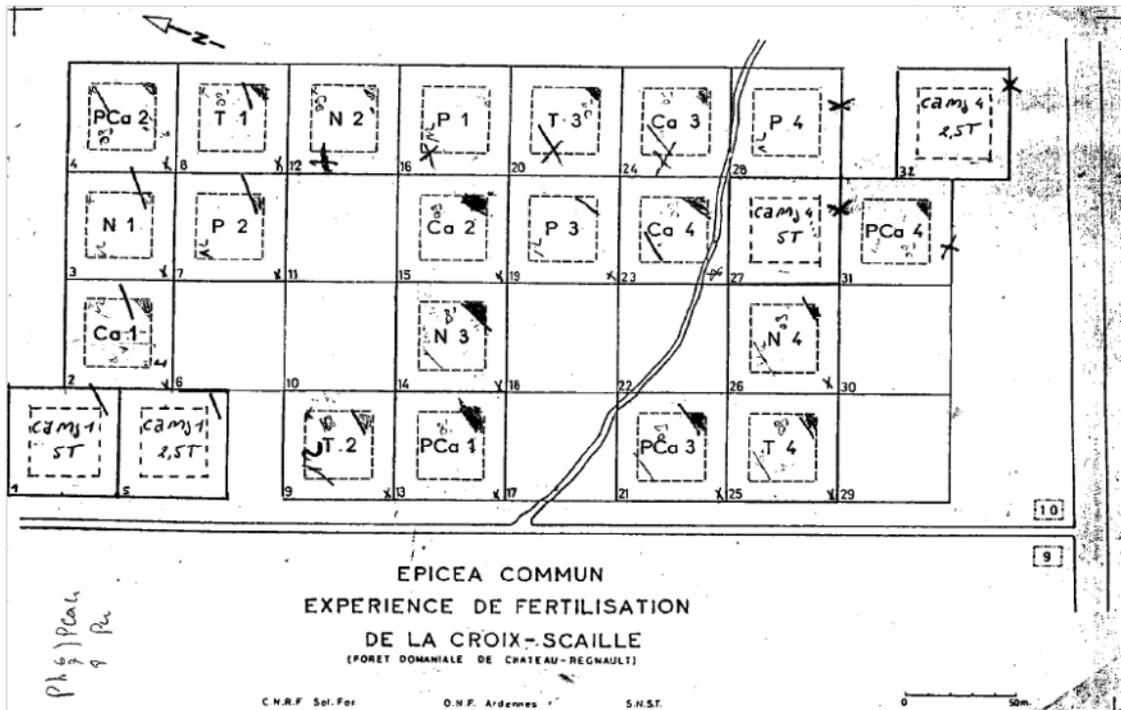


Précision : Dispositif de Darney.

Forêt de DARNEY : Essai de fertilisation



Précision : Dispositif de Croix-Scaille-Epicéa



10.3. ANNEXE 3 : NOMBRE D'OBSERVATIONS ET D'ARBRES PAR TRAITEMENT ET PAR SITE

Essence	Site	Trait	N° arbres	N° Obs	
Chêne sessile	Croix-Scaille	CaCO3	13	605	
		CaMg	8	380	
		CaSO4	24	1111	
		T	12	533	
	Bercé	Nca	13	894	
		NPKCaMg	15	1069	
		T	12	848	
	Total		97	5440	
Chêne pédonculé	Potées	CaMg	30	650	
		T	30	654	
	Total		60	1304	
Hêtre	Darney	Ca	106	14679	
		NPKCa	116	16091	
		NPKCa1	99	13693	
		P	116	16139	
		Pca	119	16630	
		T	114	15979	
	Fougères	Ca	65	5059	
		N	72	5644	
		NPKCa	58	4567	
		P	59	4696	
		T	73	5819	
	Total		997	118996	
	Sapin	Hospices	Ca	43	4868
			N	39	4303
Nca			34	3676	
NP			40	4439	
NPCa			38	4198	
P			43	4616	
PCa			42	4508	
T			152	16990	
Vosges		Ca	166	9146	
		CaMg	161	8784	
		KMg	163	8819	
		NPKCaMg	161	8842	
		T	149	8044	
		Total		1231	91233
Epicéa		Croix-Scaille	Ca	152	7264
	N		140	6642	
	P		129	6158	
	PCa		139	6593	
	T		142	6848	
	Total		702	33505	

10.4. ANNEXE 4 : DESCRIPTION DU PROFIL DU SOL POUR LE SITE DE CROIX-SCAILLE-CHENE

Site	Type de sol	Horizons			Couleur	Texture	Structure	Taches	Compacité	Éléments grossiers	Racines (%)	Couche	Référence
		Nomenclature	Profondeur	Limites									
Croix-Scaille-Chêne	Brun-acide	A11	0-5cm	/	brun-noir	LI	grumeleuse friable	/	/	15	85	1	Nys 1987
		A12	5-8cm	limite ondulée	marron-gris		grumeleuse friable			10			
		A1(B)	8-25cm	/	marron-brun		/			10			
		B	25-50cm		brun-jaune		Sub-polyédrique friable			15			
		(B)C	50-85cm	/	gris-bleuté	LS	pas de structure défini	20		15	2		
		C	85-100cm		/	LS	/	43					

10.5. ANNEXE 5 : DESCRIPTION DU PROFIL DU SOL POUR LE SITE DE BERCE

Site	Type de sol	Horizons			Couleur	Texture	Structure	Taches	Compacité	Éléments grossiers (%)	Racines (%)	Couche	Référence
		Nomenclature	Profondeur	Limites									
Bercé	lessivé à pseudogley	A	0-2cm	/	brun-gris foncé	LI	continue à grumeleuse peu nette	/	/	0	20	1	Brêtes et Ultrich,1997 (Renecofor)
		BPh	2-5cm		brun		continue, sec		peu compact				
		Eg1	5-40cm		beige foncé		continue						
		Eg2	40-50cm	transition ondulée	beige foncé		continue		compact				
		BTg	50-90cm	brun-gris claire	AL	prismatique nette							
		Cg	90-120cm	/		brun franc	polyédrique anguleuse			10			

10.6. ANNEXE 6 : DESCRIPTION DU PROFIL DU SOL POUR LE SITE DES POTEES

Site	Type de sol	Horizons			Couleur	Texture	Structure	Taches	Compacité	Éléments grossiers (%)	Racines (%)	Couche	Référence
		Nomenclature	Profondeur	Limites									
Les Potées (Ardennes)	Brun-acide	A	0-6cm	/			structure en miette bien développée (5cm)	/		0	90	1	Génét, 2009
		E1	6-33cm				structure de miette						
		E2	33-66cm				structure en bloc subanguler (3-4cm)						
		BT	66-98cm										
		BT/C	98-132cm				structure polyédrique faiblement développée						

10.7. ANNEXE 7 : DESCRIPTION DU PROFIL DE SOL POUR LE SITE DE FOUGERES

Site	Type de sol	Horizons			Couleur	Texture	Structure	Taches	Compacité	Éléments grossiers (%)	Racines (%)	Couche	Référence
		Nomenclature	Profondeur	Limites									
Fougères	Brun-acide	Ah	0-20cm	/	/	LI	structure glossique (grise)	presence de gloses au desous de 60cm. Tache hydromorphe 40-58 cm)	non-compacté (traces de compactation)	0	80	1	Legout, 2008; Peiffer, 1996
		E	20-80cm		présence de grains rouilles				non-compacté				
		B(T)g	80-130cm		brun rougeâtre	compacité à caractère fragipan	90	20	2				
		B/C	130-180cm		LS	compacité-granitique							
		C	>180cm		/	S	/	gloses qui occupent <1% de surface (fome entonnaoir)	granitique	80			

10.8. ANNEXE 8 : DESCRIPTION DU PROFIL DE SOL POUR LE SITE DE DARNEY

Site	Type de sol	Horizons			Couleur	Texture	Structure	Taches	Compacité	Éléments grossiers (%)	Racines (%)	Couche	Référence
		Nomenclature	Profondeur	Limites									
Darney	Brun-acide	A1	0-12cm	irrégulière	brun-noir	Lsa	grumeleux fin		meuble	0	90	1	Barbaroux, 1997
		(B)1	12- 52cm		brun	LSa	polyédrique é moussé	MO+ galeries (lombrices)	meuble	10			
		(B)2	52-92cm	graduelle	brun	LSa	polyédrique é moussé	MO+ galeries	meuble	15			
		B/C	92-127cm	ondulée	brun-beige	LS	polyédrique	altération	moyenne				
		C	127-180cm	irrégulière	beige	S		altération-rubéfaction	médiocre	10	2		

10.9. ANNEXE 9 : DESCRIPTION DU PROFIL DE SOL POUR LE SITE DES HOSPICES

Site	Type de sol	Horizons			Couleur	Texture	Structure	Taches	Compacité	Éléments grossiers (%)	Racines (%)	Couche	Référence		
		Nomenclature	Profondeur	Limites											
Hospices	Brun-acide	A0A1	0-7cm	/	/	/	/	/	/	0	90	1	Lefèvre, 1970		
		Bh	7-15cm							LI				particulaire	5
		Bs1	15-30cm							LS				floconneuse nette	0
		Bs2	30-60cm							SL				floconneuse moins nette	15
		B/C	>60cm							S	/	10		2	

10.10. ANNEXE 10 : DESCRIPTION DU PROFIL DE SOL POUR LE SITE DES VOSGES

Site	Type de sol	Horizons			Couleur	Texture	Structure	Taches	Compacité	Éléments grossiers (%)	Racines (%)	Couche	Référence	
		Nomenclature	Profondeur	Limites										
Vologne	sols superficiels acides et pauvres	/	0-40 cm	/	brun	LSA	/	/	/	25	60	1	Lebourgeois, 1991; Lefèvre, 2013	
			40-150cm							30	40	2		
Mortagne 22	sols plus profonds, acides et pauvres		0-40 cm			SA				20	70	1		
			40-150cm			SA				30	30	2		
Mortagne 2-14	sols plus profonds, acides et pauvres		0-40 cm			S				20	70	1		
			40-150cm			SA				30	30	2		
Greendelbruch	pauvres-acides		0-40 cm			SL				50	60	1		
			40-150cm			SL				40	40	2		
Russ	sols profonds et riches en minéraux		0-40			noir				LSA	60	70		1
						brun					40	30		2

10.11. ANNEXE 11 : DESCRIPTION DU PROFIL DE SOL POUR LE SITE DE CROIX-SCAILLE-ÉPICEA

Site	Type de sol	Horizons			Couleur	Texture	Structure	Taches	Compacité	Éléments grossiers (%)	Racines (%)	Couche	Référence
		Nomenclature	Profondeur	Limites									
Croix-saille-Épicéa	Brun-acide	A11	0-5cm	/	noir	LI	particulaire	/		0	90	1	Nys 1987
		Ah	5-7cm		marron foncé		sub-grumeleuse						
		A1(B)	7-25cm		marron brun		peu nette (sub-polyédrique)						
		(B)	25-50cm	limote progressive	brun clair		sub-polyédrique peu stable						
		(B)C	50-85cm	passage progressif, ondulé	gris bleuté	LS	/			25			
		C	85-100cm	/	blues avec taches ruille					40	10	2	

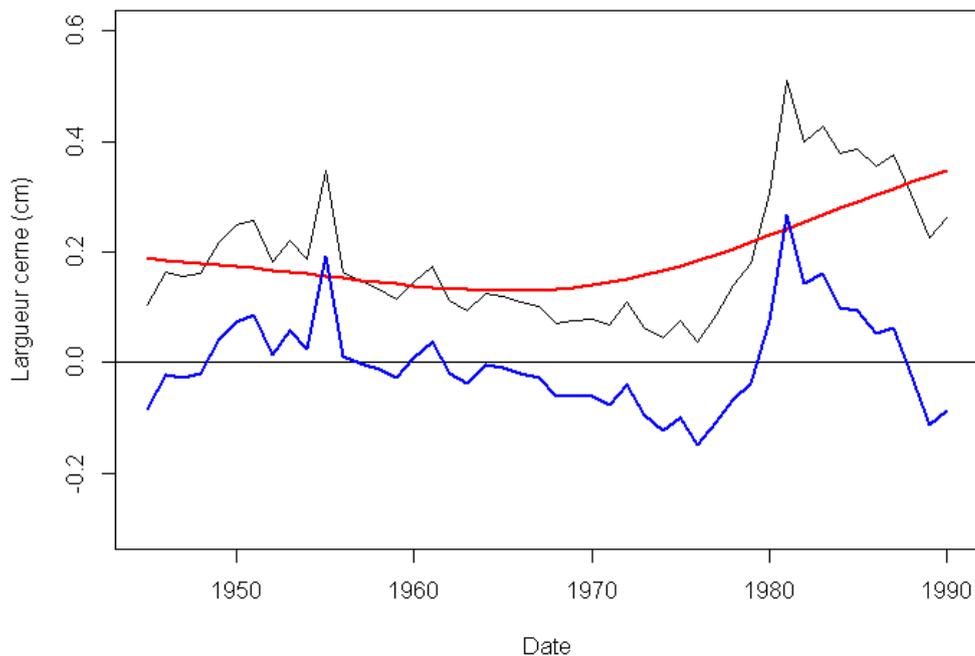
10.12. ANNEXE 12 : LES PERIODES DES DONNEES CLIMATIQUES POUR LES STATION METEOROLOGIQUE CHOISISSES

Site	Station	Serie de données climat	Année. fertilisat°- Carottage	Années	
				avant fertilisat°	après fertilisat°
Bercé	Le Mans	1949-2009	1970-2008	22	39
Fougères	Rennes-St Jacques	1951-1996	1973-1994	23	21
Potées	Charleville-Mez et Reims-Courcy	1993-2007	1995-2007	3	12
Croix-Scaille (Chêne)	Reims-Courcy	1950-1997	1990-1997	40	7
Croix-Scaille (épicéa)			1981-1991	31	10
Russ/Grendelbruch	Enzheim	1950-1997	1985-1990	36	6
Mortagne/Vologne	Luxeuil	1956-1997	1985-1990	30	6
Darney			1971-1996	16	25
Hospices			1970-1988	14	20

10.13. ANNEXE 13 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA STANDARDISATION ARBRE PAR ARBRE

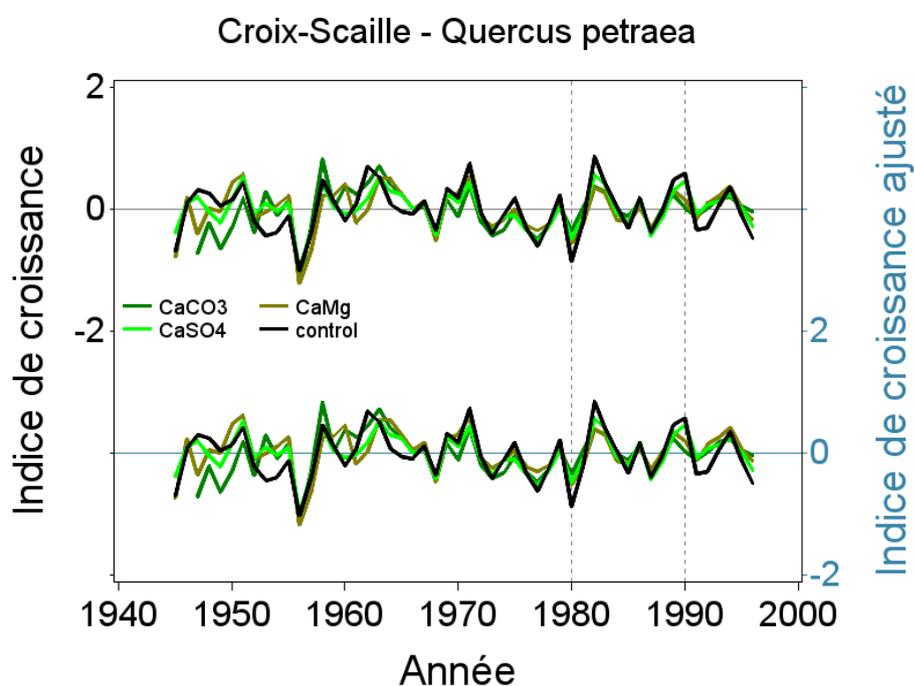
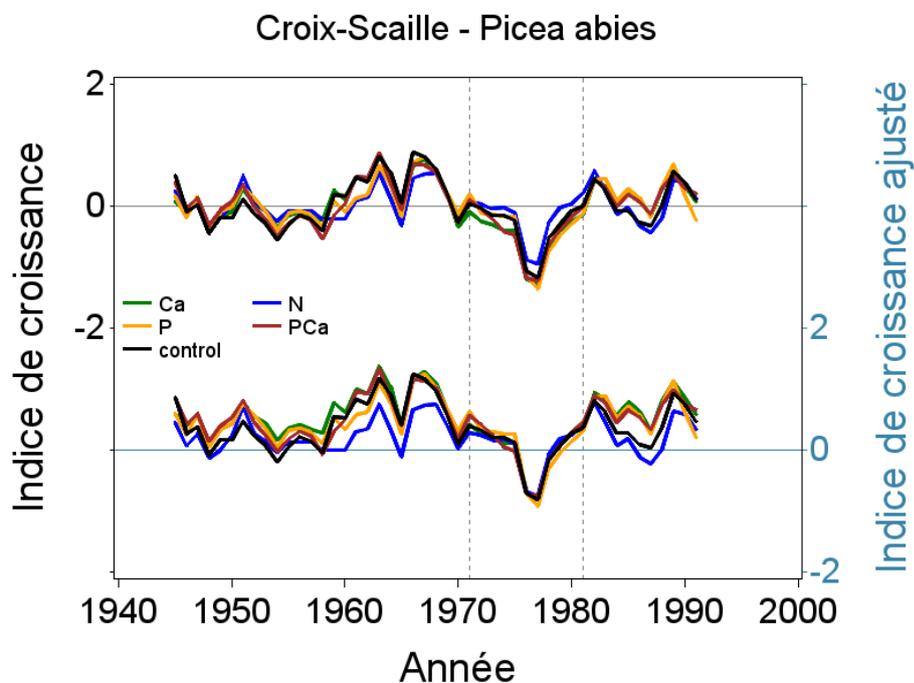
Précision : ligne noir : courbe réelle ; ligne rouge : courbe *spline* (standardisation) ; ligne bleu : résidu différence entre courbe réelle et courbe *spline*.

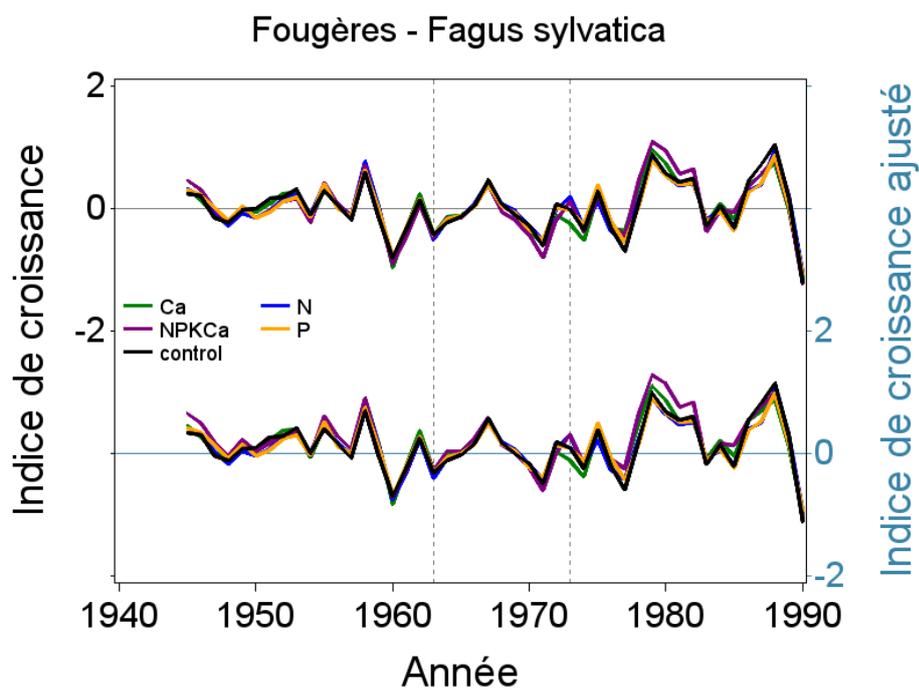
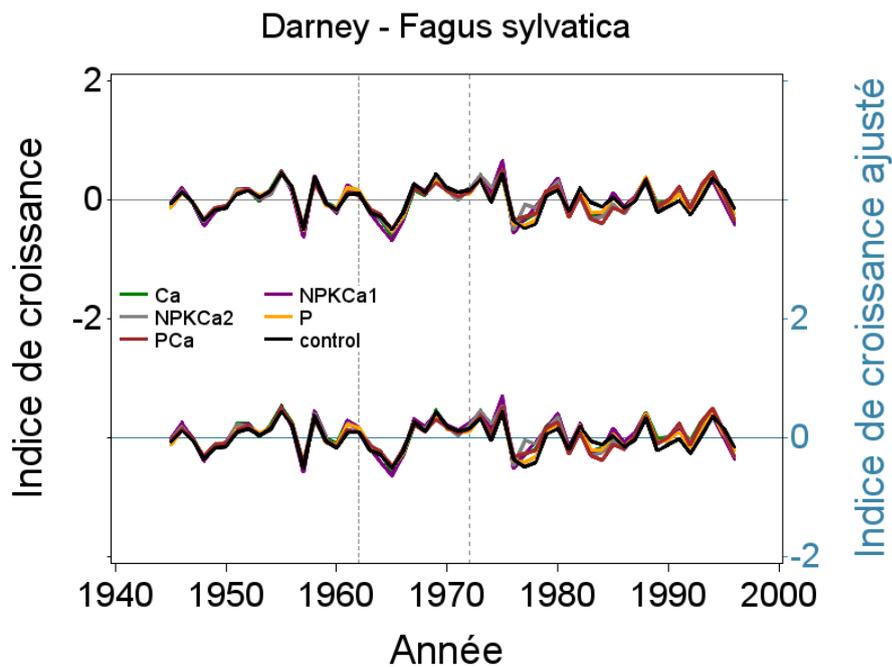
Comparaison entre la courbe réelle et spline

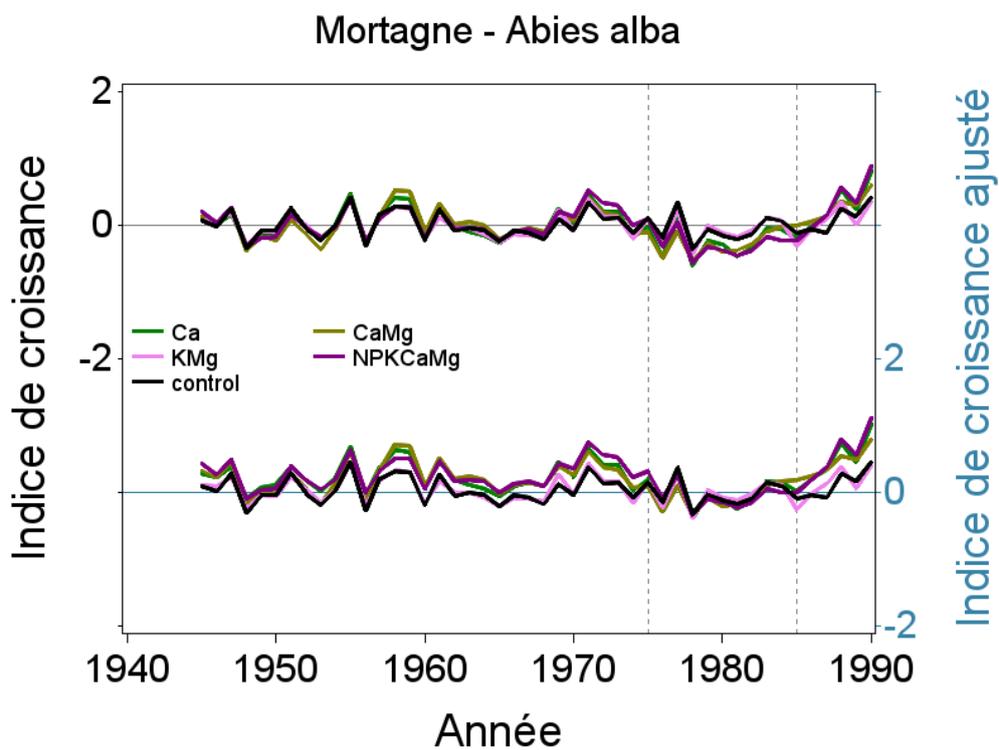
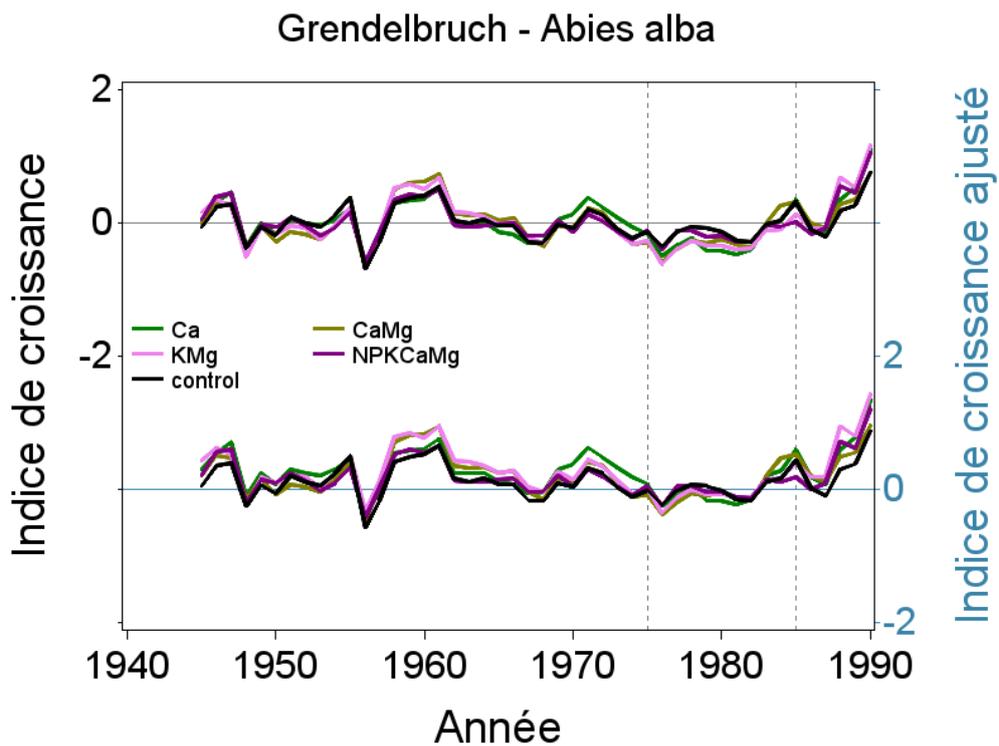


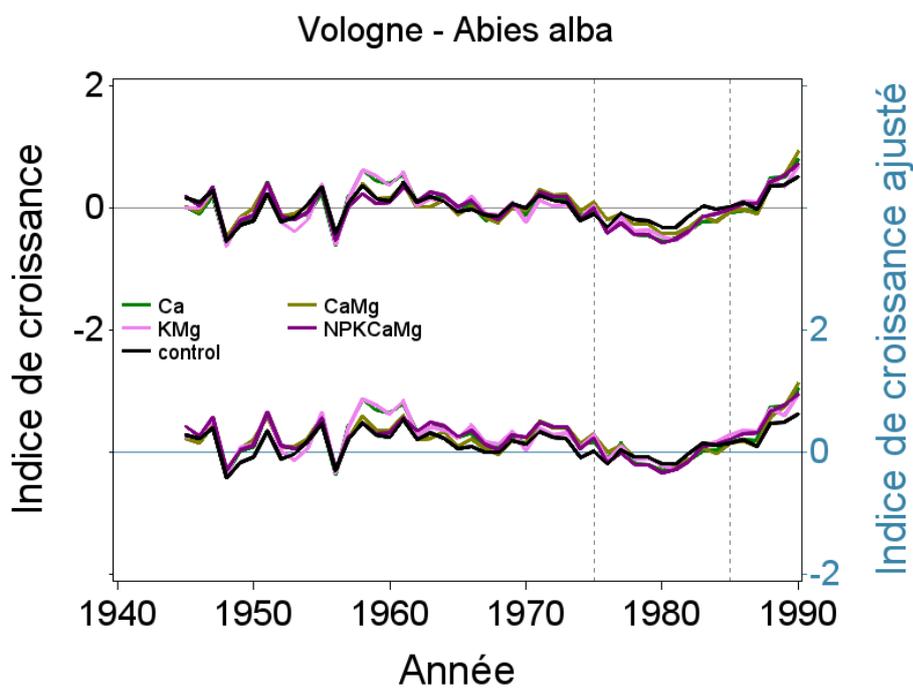
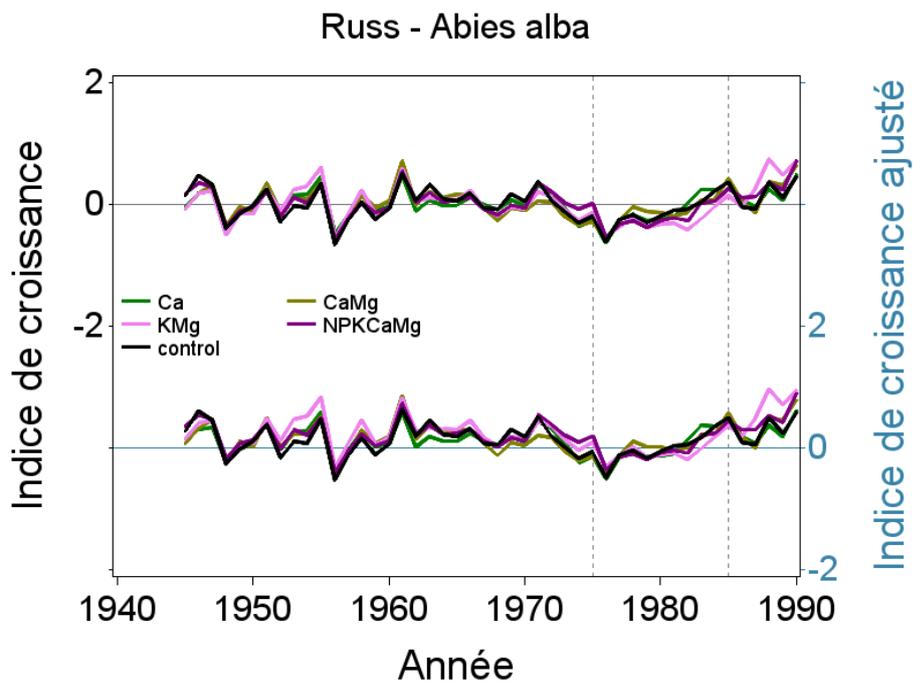
10.14. ANNEXE 14 : AJUSTEMENT DE L'INDICE DE CROISSANCE AU LONG DE LA SERIE CHRONOLOGIQUE

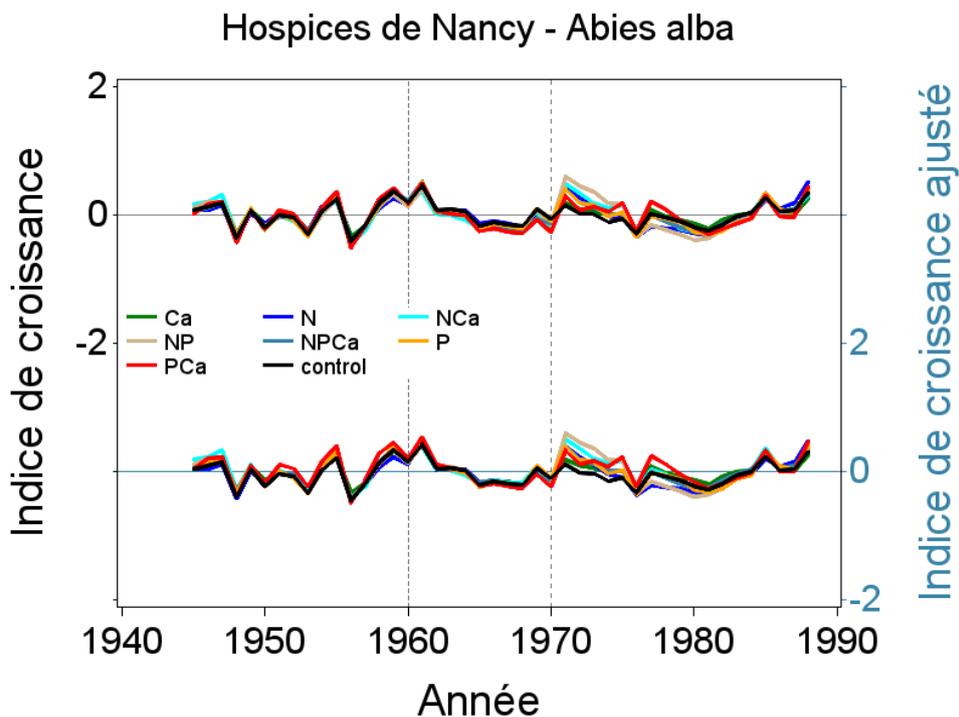
Précision : En pointillées : correction sur 10 ans précédant la date de fertilisation/amendement



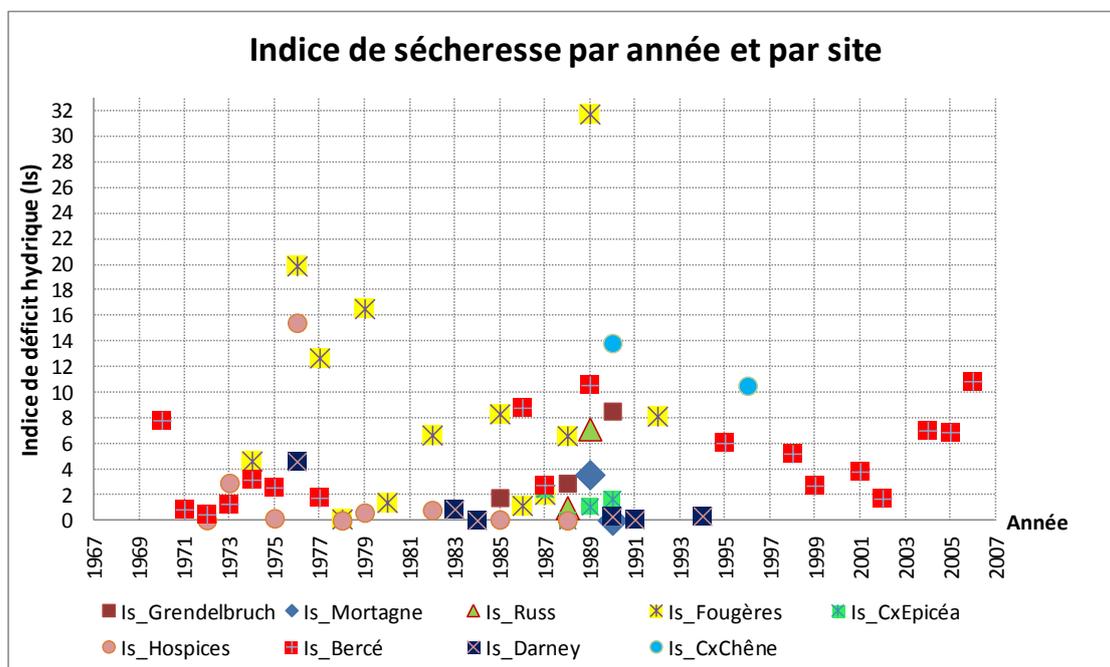






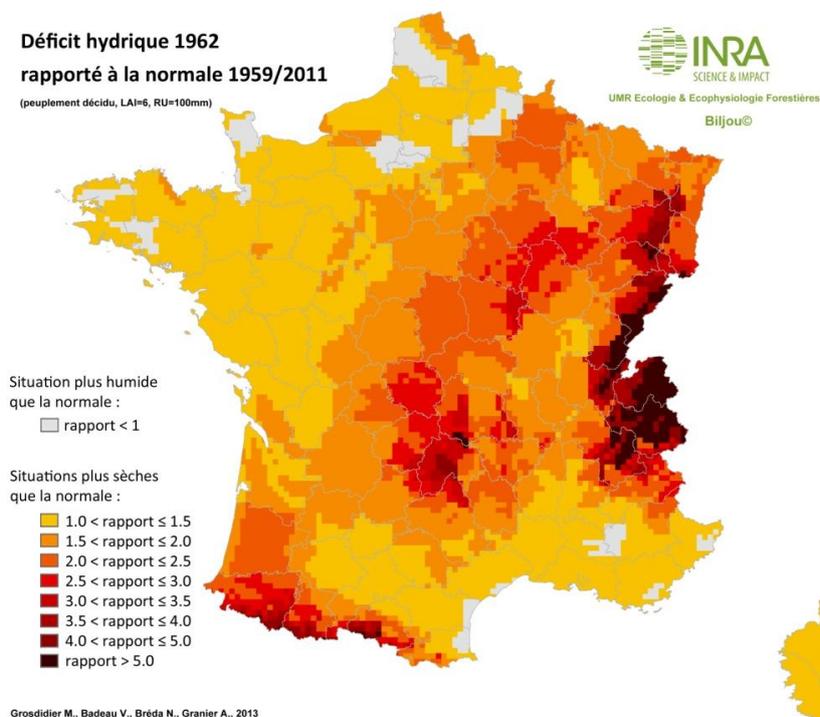
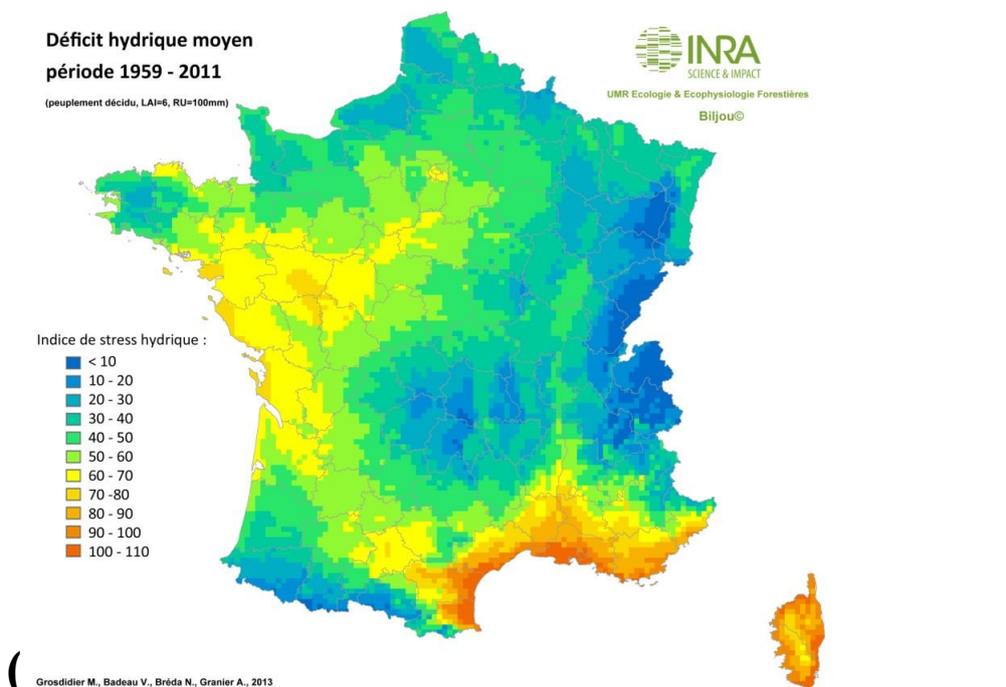


10.15. ANNEXE 15 : INDICE DE DEFICIT HYDRIQUE POUR LES ANNEES OU IL EXISTE UN EFFET D'AU MOINS UN ESSAI DE FERTILISATION/AMENDEMENT SUR LA CROISSANCE RADIALE



10.16. ANNEXE 16 : CARTE DU DEFICIT HYDRIQUE DES ANNEES LES PLUS SECHES EN FRANCE DEPUIS 1952

Précision : Déficit hydrique par rapport à la moyenne du période 1959-2011



Déficit hydrique 1976 rapporté à la normale 1959/2011

(peuplement décidu, LAI=6, RU=100mm)



UMR Ecologie & Ecophysiologie Forestières

Biljou©

Situation plus humide
que la normale :

☐ rapport < 1

Situations plus sèches
que la normale :

- ☐ 1.0 < rapport ≤ 1.5
- ☐ 1.5 < rapport ≤ 2.0
- ☐ 2.0 < rapport ≤ 2.5
- ☐ 2.5 < rapport ≤ 3.0
- ☐ 3.0 < rapport ≤ 3.5
- ☐ 3.5 < rapport ≤ 4.0
- ☐ 4.0 < rapport ≤ 5.0
- ☐ rapport > 5.0

Grosdidier M., Badeau V., Bréda N., Granier A., 2013

Déficit hydrique 1989 rapporté à la normale 1959/2011

(peuplement décidu, LAI=6, RU=100mm)



UMR Ecologie & Ecophysiologie Forestières

Biljou©

Situation plus humide
que la normale :

☐ rapport < 1

Situations plus sèches
que la normale :

- ☐ 1.0 < rapport ≤ 1.5
- ☐ 1.5 < rapport ≤ 2.0
- ☐ 2.0 < rapport ≤ 2.5
- ☐ 2.5 < rapport ≤ 3.0
- ☐ 3.0 < rapport ≤ 3.5
- ☐ 3.5 < rapport ≤ 4.0
- ☐ 4.0 < rapport ≤ 5.0
- ☐ rapport > 5.0

Grosdidier M., Badeau V., Bréda N., Granier A., 2013

Déficit hydrique 2003 rapporté à la normale 1959/2011

(peuplement décadu, LAI=6, RU=100mm)



UMR Ecologie & Ecophysiologie Forestières

Biljou©

Situation plus humide
que la normale :

□ rapport < 1

Situations plus sèches
que la normale :

- 1.0 < rapport ≤ 1.5
- 1.5 < rapport ≤ 2.0
- 2.0 < rapport ≤ 2.5
- 2.5 < rapport ≤ 3.0
- 3.0 < rapport ≤ 3.5
- 3.5 < rapport ≤ 4.0
- 4.0 < rapport ≤ 5.0
- rapport > 5.0

Grosdidier M., Badeau V., Bréda N., Granier A., 2013

