



Analyse rétrospective des relations nappe- végétation de sous-bassins versants forestiers de la rivière Leyre

Marie Guillot

► To cite this version:

Marie Guillot. Analyse rétrospective des relations nappe- végétation de sous-bassins versants forestiers de la rivière Leyre. Sciences du Vivant [q-bio]. Université des Sciences et Technologies (Bordeaux 1), 2011. Français. NNT: . tel-02810698

HAL Id: tel-02810698

<https://hal.inrae.fr/tel-02810698>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE « SCIENCES ET ENVIRONNEMENTS »

Par **Marie GUILLOT**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Physique de l'Environnement

**ANALYSE RETROSPECTIVE DES RELATIONS NAPPE-
VEGETATION DE SOUS-BASSINS VERSANTS FORESTIERS
DE LA RIVIERE LEYRE.**

Directeur de thèse : Denis LOUSTAU

Co-directeur : Jean-Pierre WIGNERON

Soutenue le : 8 décembre 2011

Devant la commission d'examen formée de :

M. ANSCHUTZ, Pierre	Prof. Université Bordeaux I	Président
Mme HABETS, Florence	CR. Ecole des Mines Paris	Rapporteur
M. CALVET, Jean-Christophe	ICPC, Météo-France, Toulouse	Rapporteur
Mme VIOLETTE, Sophie	CR Université Paris VI	Examineur
Mme. BREDAS, Nathalie	DR. INRA Nancy	Examineur
M. LOUSTAU, Denis	DR INRA Bordeaux	Directeur
M. WIGNERON, Jean-Pierre	DR INRA Bordeaux	Co-directeur

REMERCIEMENTS

Il était une fois un rêve qui se réalise. Un conte de fée, ça n'existe que dans les livres, n'est-ce pas ? Alors même si tous les jours n'ont pas été faciles comme au pays des merveilles, je tiens à remercier chaleureusement tous ceux qui m'ont aidé, soutenu, encouragé pendant ces 4 dernières années, et à leur dire que sans eux, l'histoire n'aurait surement pas été si bien écrite.

Au commencement, il y a eu les mécènes. Je remercie l'Université de Bordeaux I d'avoir financé ma bourse de thèse pendant 3 ans et demi, l'INRA de m'avoir accueillie et financée pendant les 6 derniers mois, et le GIP ECOFOR d'avoir subventionné nos équipements sur le terrain.

A la fin de l'histoire, il y a eu mon jury de thèse, qui m'a adoubée Doctoresse. Je remercie Mr ANSCHUTZ Pierre, professeur de l'Université Bordeaux I, qui a bien voulu présider le jury. Je remercie aussi chaleureusement Mme HABETS Florence et Mr. CALVET Jean-Christophe, qui ont eu la lourde tâche d'être les rapporteurs de ce manuscrit, pour la justesse et les remarques constructives issues de leur lecture attentive. Enfin, je remercie Mme VIOLETTE Sophie et Mme. BREDA Nathalie d'être venues m'examiner pendant mon grand oral.

Comme dans toute histoire, il y a les pères fondateurs. Dans mon cas, il s'agissait de mes deux directeurs de thèse, Denis Loustau et Jean-Pierre Wigneron. Merci à tous les deux pour votre suivi pendant toutes ces années, pour la liberté que vous avez su me laisser pour conduire mes travaux, et pour votre attention lorsque j'ai eu besoin de vos lumières. A Denis, je me rappellerais sans aucun doute souvent de notre discussion lors d'un voyage à Rennes, où tu as fait le parallèle entre les études aux beaux-arts que j'aurais aimé faire, et les études biologiques que j'ai finalement suivi. Tu avais raison, il y a une part de créativité dans la science. Merci donc de m'avoir laissé exprimer ma créativité scientifique ! A Jean-Pierre, un tout grand merci pour ta diplomatie, tu as toujours su prendre de la hauteur vis-à-vis des enjeux et relativiser les problèmes du quotidien afin de garder en tête l'objectif à long terme. Nous étions tous les trois l'équilibre parfait qui a fait que le triangle a pu fonctionner.

Comme il se doit, 3 bonnes fées se sont penchées sur mon berceau de jeune scientifique... La première, Mme Weiss Geneviève, était ma « prof » de biologie au Lycée Agropolis... C'est elle qui m'a donné le goût de la science, la passion des organismes vivants, et qui m'a initié à l'écologie. La seconde, Mme Guyon Dominique, ingénieure de recherche à l'INRA, a été ma maitresse de stage en Master. Elle m'a donné l'amour du travail bien fait, la valeur du travail en équipe, la patience du chercheur d'or qui recommence 100 fois à battre le sable et l'eau pour trouver la pépite ! Apprendre à devenir scientifique sous sa direction a été une expérience formatrice et formidable ! Ma dernière

fée, Mme Violette Sophie, chargée de recherche à l'UMR Sisyphe (Paris VI), m'a redonné le souffle quand j'étais épuisée, le goût et la joie à travailler sur un projet que je connaissais déjà trop bien, mais, qu'au travers son regard expert, je revoyais sous un nouveau jour. Au delà du travail, c'est un sentiment d'amitié qui est né de cette collaboration, que j'espère nous conserverons longtemps.

Il y a aussi des gens inclassables, dont le rôle dans l'histoire est bien loin d'être secondaire. Dans cette histoire, rien n'aurait pu être écrit sans Sylvia Dayau, qui m'a supporté (dans tous les sens du terme, dans mes excès de fureur, de découragement, de joies aussi) pendant ces 4 années et qui m'a apporté l'aide technique (et même au-delà) dont une débutante comme moi avait grand besoin pour aller au bal. Je ne saurais trouver les mots pour te dire toute ma gratitude, et d'ailleurs, il n'y aura jamais de point final à une phrase qui concerne ce que je te dois. Encore une fois, je sais que l'amitié et le respect mutuel qui est né de notre travail en commun ont de longs jours devant eux.

J'ai eu de merveilleux compagnons d'aventures. Tout d'abord, Nathalie, qui a partagé mon bureau pendant plus de 3 ans, merci à toi d'avoir rendu cet endroit aussi chaleureux ! J'en garde la tradition des gourmandises et du calendrier de l'avent ! Grâce à ta présence, cet endroit où nous passions plus de 10h par jour est devenu comme un petit chez nous ! J'ai ensuite changé de bureau, pour une voisine non moins charmante, Virginie. Grâce à toi, ces derniers mois de galère ont été enrobés d'amitié, dans notre cabane, là-bas, tout en haut. Il y a eu aussi Katarina, avec qui j'ai collaboré pendant 8 mois, la stagiaire la plus merveilleuse du monde ! Brillante et drôle, tu es un bâton de dynamite ou de vitamines C concentrée au choix ! Tu feras des grandes choses, parce que tu as du talent, mais aussi parce que tu es irrésistible !! A Christophe M., merci d'avoir su anticiper mes besoins avant même que je n'en formule le désir, grâce à toi, les problèmes techniques n'étaient que des mauvais souvenirs. Je regrette que nous n'ayons pas pu collaborer aussi étroitement qu'initialement prévu, car je suis persuadée que nous aurions fait un sacré tandem !

Mais je ne peux pas oublier Stéphanie H., Britta, Heather, Marion, Gaëtan, Laura, Stéphanie D., Magali, David, Ali, Nicolas, Jean-Charles, Tovo, Guy, Françoise, Patricia, Valérie, Didier, Alain, Anne-Marie, Alexandre,... La liste est tellement longue ! Merci à tout le laboratoire Ephyse, je n'ai jamais compris pourquoi certaines choses ne fonctionnaient pas alors que vous êtes tous des gens extraordinaires ! Je vais donc faire le vœu que la magie opère et que l'avenir s'écrive en lettres d'or pour votre unité !

Merci à tous ceux qui ont participé au projet : à l'IFN et à Thierry Bélouard en particulier, pour la mise à disposition de la base de données des coupes rases et des statistiques forestières sur notre zone d'étude, à l'UMR Sysiphe et spécifiquement Emmanuel Ledoux, Patrick Goblet et Fayçal Rejiba, au CNRM pour la mise à disposition de la base de données météorologique SAFRAN et à Catherine Meurey pour sa réactivité, à l'UE et à Fred Bernier pour les campagnes d'inventaires, à Didier Bert, BIOGECO, pour son aide sur la partie dendrochronologique et pour son humanité (merci pour nos discussions sur l'après-thèse à un moment où j'étais perdue), à tous nos partenaires qui nous ont aidé dans cette étude

: les propriétaires et gestionnaires des parcelles mises à disposition, merci pour votre confiance, la DFCI, le PNR des Landes de Gascogne et en particulier Cathy Navrot, la DREAL (anciennement DIREN) et en particulier Bernard Gaillard, Pierre-Marie Bechon, et Alain Mercier, le BRGM et en particulier Pauline Corbier et Fondin Anne, le laboratoire EGID et en particulier Dupuy Alain, le laboratoire TCEM et en particulier Laurent Augusto, au CEMAGREF et en particulier Jean-Claude Chossat et Françoise Vernier, au SAS Rennes et en particulier Jérôme Molénat (maintenant LISAH) et Patrick Durant, au LISAH de Montpellier et en particulier Jean-Christophe Fabre.

Enfin, je ne saurais terminer l'histoire sans remercier ma famille et mes amis, pour leur soutien inconditionnel. A mes parents, et à mes deux plus fidèles supportrices, ma sœur Carine et ma petite sœur de cœur, Julie, je vous dis un grand merci pour votre amour, qui m'ont menés là où j'en suis. A ma maman un merci tout particulier, elle qui est venue me soutenir dans les dernières heures, à relu maintes fois le manuscrit pour traquer les fautes, et qui a veillé à mes côtés jusqu'au petit matin la veille du jour du dépôt du manuscrit...

Comme dans tous les contes, il y a un prince charmant ! Matthieu, nous avons beaucoup sacrifié à ce projet de recherche, mais tu m'as toujours encouragé, sans ton amour et la force que tu as su m'insuffler, je n'aurais pas été au bout... C'est maintenant le temps de profiter de ce « nous » qui reste encore à écrire...

Ils vécurent heureux et eurent beaucoup de petits chats... ☺

RESUME

Dans les Landes de Gascogne, le fonctionnement de la nappe phréatique superficielle plio-quaternaire est très liée au fonctionnement de la végétation subjacente. Pour comprendre la variabilité à l'échelle du paysage de la productivité de ces forêts, il est important de passer de l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant.

La mise en place d'un dispositif de suivi de type bassins versants jumelés à l'échelle de petits bassins versants forestiers situés dans le Massif Landais : les bassins versants du Tagon (Biganos) et du Bouron (Belin-Beliet) a permis le suivi hydrologique et piézométrique de la nappe plio-quaternaire. Le dispositif inclut une modification du couvert végétal par l'occurrence de deux tempêtes successives à 10 ans d'intervalle. La collecte de données cartographiques, numériques et statistiques a permis une reconstitution de l'usage des terres et des classes d'âges des peuplements forestiers, pour la période 1984- 2010 sur les deux bassins versants. Cette reconstitution a ainsi permis de retrouver l'évolution des stocks de carbone et de biomasse des peuplements pour les deux sites expérimentaux et de quantifier l'impact d'une tempête sur l'organisation paysagère des peuplements (âge et variabilité).

Le lien entre les forêts de Pin maritime et la nappe phréatique plio-quaternaire a été mis en évidence par : (1) l'étude de la croissance des arbres pour des sites où la profondeur de la nappe était contrastée, au travers d'une étude dendrologique et (2) l'analyse d'oscillations journalières sur les séries chronologiques des fluctuations demi-horaires du niveau phréatique, qui peuvent être attribuées à l'évapotranspiration journalière. La compréhension des liens entre variables hydroclimatiques et quantité de bois produite, i.e. largeur de cerne, de manière rétrospective, a permis d'identifier les facteurs de variabilité et les facteurs limitants pour chaque type de site, en lien avec la profondeur de la nappe superficielle. L'analyse des chroniques piézométriques a mis en lumière l'importance des prélèvements journaliers dans la vidange de l'aquifère.

La dernière partie de ce travail pose les bases d'une future modélisation couplée végétation-nappe pour le bassin versant du Bouron. La reconstitution spatiale du fonctionnement de la nappe phréatique a été entreprise en régime stationnaire puis en régime dynamique avec le modèle NEWSAM de l'Ecole des Mines de Paris. Les facteurs expliquant le fonctionnement de l'aquifère et les flux d'eau à l'échelle de la petite région sont identifiés. L'effet de la recharge, issue du modèle de végétation pour le Pin maritime GRAECO, est en particulier testé, via une étude de sensibilité, en relation avec les différences de recharge induites par les différents types de couverts, et en particulier, l'âge des peuplements. Les points clefs à améliorer sont identifiés afin de perfectionner les modèles utilisés, et de reproduire de façon réaliste le fonctionnement de petits bassins versants dans la région.

Mots clefs : *Pinus pinaster*, bassin versant, nappe plio-quaternaire, fonctionnement hydrogéologique, bilan de carbone, cartographie rétrospective des peuplements, dendrochronologie, oscillations diurnes de nappe, modélisation.

ABSTRACT

In the Landes de Gascogne area, the functioning of the shallow plio-quaternary water-table is tightly linked with the functioning of the top vegetation. In order to understand the variability of forest productivity at the landscape scale, there is a need to move forward the stand scale to the watershed scale.

Part of this study was to setup hydrological equipment of paired-watershed, representative of the forested plain in the Leyre watershed, considering water-table level and hydrologic measurement. The selected sites were the Bouron watershed (Belin-Beliet) and the Tagon watershed (Biganos), which were contrastingly impacted by two storms within the last 10 years. The land-cover cartography was obtained with satellite, in-situ and statistical data, on a retrospective basis, accross the 1984-2010 period. Those maps give the evolution of the land use and the *Pinus pinaster* stand age. The reconstitution of the age structure thought time, converted to carbon and biomass stock, are showing the impact of a storm, comparing the control watershed to the damaged one.

The link between forests and water-table was explored on : (1) the growth of trees developing in sites with contrasted water-table levels, by way of dendrological measurement and (2) the analysis of diurnal oscillation on the water-table level signal, attributed to vegetation removal. The understanding of the link between hydroclimatic data and wood production, i.e., ring width, shows that limiting factors should not be the same across different sites. In particular, water-table deeper than 3 meter is not a determinant resource for growth, but nutriment may be more limiting at those sites. On the other side, discharge of the water-table cannot be dissociated to evapotranspiration reprise. Oscillations in the diurnal signal of water-table level shows that this removal can be determinant, and deeper than expected according to the vegetation cover.

The last part of this work build the basis of a future model, representing the coupling between vegetation and water-table at the watershed scale. The dynamic of the aquifer was simulated in permanent and transient state with the NEWSAM hydrogeological model (Ecole des Mines, Paris). Different processes were identified as key factor to explain water-table functioning, such as recharge effect, zone vadose impact and surface drainage. The recharge effect, coming from GRAECO, was particularly tested, thought a sensitivity analysis, in relation with growing proportion of young forest stand (less than 5 years old). Points to improve and refine are identified in order to perfect the two models used here.

Keywords : *Pinus pinaster*, watershed, plio-quaternary water-table, hydrogeological functioning, carbon budget, retrospective cartography of land use, dendrochronology, diurnal fluctuation of water-table level.

SOMMAIRE

Chapitre I	13
Introduction générale et présentation des objectifs	
Chapitre II	29
Présentation générale et sites expérimentaux	
Chapitre III	75
Etude rétrospective de la dynamique spatio-temporelle des peuplements de Pin maritime sur les deux sites expérimentaux pour la période 1984-2007	
Chapitre IV	119
Etude de la productivité et de la croissance du Pin maritime en fonction de la profondeur de nappe plio-quaternaire	
Chapitre V	161
Mesure et analyse des fluctuations de la nappe plio-quaternaire pour les bassins versants du Bouron et du Tagon (2009-2011)	
Chapitre VI	201
Modélisation hydrologique spatialisée : cas du bassin versant du Bouron. Etude de sensibilité aux types de couverts	
Chapitre VII	255
Conclusions et perspectives	
Bibliographie.....	263
Table des tableaux.....	281
Table des figures.....	285
Annexes	291

Chapitre I

Introduction générale et présentation des objectifs

*" Il faut choisir soi-même ce qui doit durer dans le souvenir d'autrui, mettre en relief ce qu'on a de meilleur et de plus fort [...], se concentrer, se résumer dans une œuvre qui fasse médaille"
Amiel, H.F.(Journal Intime, 1876).*

I. Table des matières

1.1	La forêt et l'eau	17
1.2	Les bassins versants forestiers	21
1.3	Contexte et objectifs de l'étude	22
1.3.1	La vallée de la Leyre.....	22
1.3.2	Problématique.....	24
1.3.3	Objectifs.....	25

La vie est apparue dans l'eau il y a environ 3 milliards d'années. L'eau est le principal composant des êtres vivants et un élément indispensable à toute forme de vie. Sans eau, aucun organisme vivant, végétal ou animal ne peut survivre. En France l'importance de cette ressource est d'ailleurs écrite dans la loi sur l'eau du 3 janvier 1992: *"L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général"* (Article 1^{er}).

La planète bleue mérite son surnom de par la grande proportion que l'eau occupe à la surface du globe. L'eau y est présente sous trois formes : liquide, en particulier dans les océans, solide, sous forme de glace, ou gazeuse, notamment dans l'atmosphère.

Les flux entre les grands réservoirs d'eau sur Terre, les océans, les eaux de surface continentales, les eaux souterraines et l'atmosphère sont connus à défaut d'être parfaitement quantifiés dans la représentation du cycle de l'eau. Ce concept aujourd'hui largement admis, n'est pourtant vieux que de 300 ans, suite à l'étude du bassin versant de la Seine par Perrault (Mc Culloch et Robinson, 1993). Deux strates y sont distinguées : une strate atmosphérique et une strate terrestre. A l'interface, les processus sont nombreux et complexes : évaporation, transpiration de la végétation, interception des pluies par le couvert végétal, ruissellement de surface, infiltration et stockage dans les sols, et enfin, écoulements de surface ou souterrains. Pour toutes ces composantes, la végétation joue un rôle déterminant, et il est difficile d'étudier le cycle de l'eau en faisant abstraction des couverts végétaux, en particulier, de la forêt, qui représente la formation végétale naturelle la plus répandue sur les continents.

1.1 La forêt et l'eau

Les forêts recouvrent environ 4300 millions d'hectares, soit approximativement la moitié de la surface terrestre (Mc Culloch et Robinson, 1993). La forêt est un moyen efficace de séquestrer le carbone (Vitousek, 1991). Jackson et al. (2005) s'interrogent sur les arrières-effets de l'afforestation sur les bilans d'eau et sur les coûts-bénéfices de la généralisation de cette pratique pour tenir les engagements de séquestration de carbone du Protocole de Kyoto. En effet, les arrières effets sur les bilans hydrologiques peuvent être très variables selon le climat, le type de sol, et la disponibilité de la ressource en eau. Comprendre le lien existant entre les forêts et l'eau est donc une thématique majeure pour la gestion des ressources à travers le monde.

Dès l'Antiquité, Pline l'Ancien avait observé le rôle hydrologique des forêts (premier siècle av. J-C). En effet, il avait déjà noté, suite à des observations sur le terrain que lorsque des forêts étaient coupées sur de grandes étendues, les *"sources sur lesquelles les arbres se nourrissaient émergeaient à nouveau"*, mais que ce phénomène allait de pair en montagne avec l'apparition de torrents dévastateurs. Ainsi, la compréhension du rôle hydrologique (sur les débits) et météorologique (sur la pluie) était déjà connue en ces temps anciens. En revanche, la cause de ce phénomène était attribuée à la capacité des arbres à "retenir les

nuages et à se nourrir à partir de leur eau". Cette croyance est restée largement admise jusqu'au XIX^{ème} siècle. Rauch (cité dans Andréassian, 2004) écrivait ainsi : "*the trees may be considered as siphons - intermediaries between the clouds and the earth; by their attracting top boughs, they command from afar the wandering waters of the atmosphere to approach and pour their protecting urns the water that is to feed the springs, make the stream flow (...)*". Cette période est marquée par un important débat sur le rôle météorologique et hydrologique des forêts, à la fois au sein des administrations, mais aussi de la population, partagées entre une vision romantique des forêts et une vision technique en quête de preuves mesurables (Ibid.). En France, la période est marquée par des inondations majeures et d'importantes sécheresses, et la population voit une explication possible dans les défrichements massifs datant de la Révolution (1789). La technique a en effet précédé la science, i.e., la connaissance des processus, de plusieurs centaines d'années. Ainsi de grands ouvrages hydrauliques de protection contre les crues ont été érigés bien avant la compréhension des mécanismes générant ces flots torrentiels, comme par exemple, le barrage de Marib, sous le règne de la Reine de Sabbath (Yémen, -700 à -750 av. JC, Mc Culloch et Robinson, 1993). Le rôle des hommes sur le cycle de l'eau et les possibles perturbations provoquées par le changement de l'utilisation des terres n'ont été compris que bien plus tard.

Depuis le XIX^{ème} siècle, il a été clairement établi que les arbres n'avaient pas le rôle de "*siphons des nuages*" qui leur avait été historiquement attribué. A l'échelle du sous-continent, les grands massifs forestiers ont cependant une influence sur la circulation atmosphérique générale et le régime des pluies (Cosandey, 1993), bien établie pour le régime hydrologique de l'Amazonie par exemple. Même à une échelle locale, la forêt peut augmenter les précipitations : de 1 à 2 % (Aussenac, 1970), voire de 5 à 6 % en climat tempéré océanique (Lambert, 1996). Ce phénomène est dû au recyclage de l'eau évaporée après avoir été interceptée par le couvert forestier, à l'évapotranspiration élevée des forêts et aux conséquences physiques et dynamiques de la rugosité des couverts forestiers (ascendance des flux d'air au dessus des lisières forestières). Blyth et al. (1994) ont ainsi estimé, via la modélisation d'évènements pluvieux, une augmentation de la pluviométrie de 3.6 mm, au lieu de 2.9 mm, pour un sol nu, liée à une plus forte évaporation, résultant de l'interception des couverts forestiers, dans le cas du Massif forestier des Landes de Gascogne.

Le rôle des forêts sur le débit des rivières est la partie immédiatement mesurable de l'ensemble des phénomènes qui entrent en jeu sur le cycle de l'eau en amont, i.e. à l'échelle du bassin versant. En effet, les interactions entre la végétation et la nappe interviennent à plusieurs niveaux : via l'interception des pluies, les prélèvements, et/ou sur la circulation de l'eau dans le sol. Les deux premiers interviennent dans le volume d'écoulement, et la sévérité des étiages, tandis que le dernier modifie les conditions de formation des crues.

A la suite des premiers travaux de recherche mondiaux sur le lien entre forêt et contrôle des torrents de montagne, la première loi sur la préservation des zones montagneuses et la réhabilitation des sols et de la forêt fut votée en 1864, en France. Depuis, une grande

partie des études internationales conduites sur l'impact de la modification des couverts vont dans le même sens : une relecture a montré qu'une modification de 10% en surface des couverts forestiers sempervirents (Eucalyptus et Pins) aboutissait à un changement du débit de 30 à 40 mm (Bosch et Hewlett, 1982). Généralement, la diminution du débit est d'autant plus visible que le climat est pluvieux.

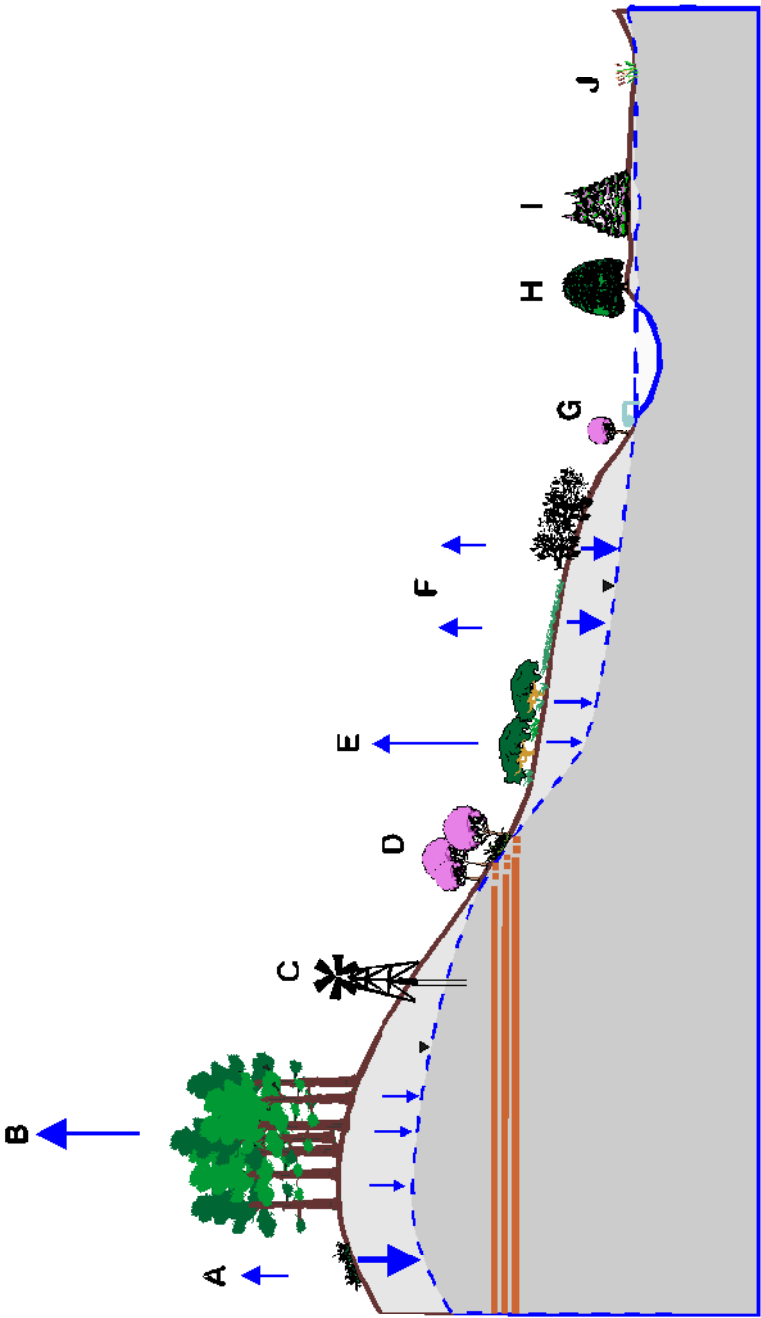
La végétation réduit la quantité d'eau arrivant au système hydrologique, i.e., la recharge, par interception : le feuillage peut ainsi stocker jusqu'à 1 à 60 % de la pluie incidente (Le Maitre et al., 1999), et cette eau peut retourner directement dans l'atmosphère par évaporation. En règle générale, l'interception par les couverts forestiers provoque une sur-évaporation et donc un moindre écoulement des bassins versants forestiers, et ce, quelque soit le niveau de déficit hydrique au cours de l'été, i.e. même lorsque le rôle de la réserve en eau du sol est secondaire (Cosandey, 1993). Cependant, le rôle de la forêt est limité dans le cas de fortes pluies, car l'interception est plus faible. Ce sont pourtant ces événements pluvieux exceptionnels qui sont à l'origine des crues dans le cas de ruissellement hortonien.

Par ailleurs, l'assimilation du CO₂ de l'air par les stomates pour la photosynthèse s'accompagne d'une évapotranspiration plus ou moins importante suivant la demande climatique. La végétation maintient une homéostasie hydrique en prélevant l'eau nécessaire pour compenser les pertes transpiratoires dans les zones non saturée et saturée du sol. La transpiration représente en moyenne 45 à 80 % des précipitations annuelles (Larcher, 1983). Les forêts, de par leur albédo plus faible et leur indice foliaire élevé, absorbent un rayonnement net important et sont donc susceptibles d'avoir une évapotranspiration élevée. De plus, la rugosité plus forte de ces couverts augmente la turbulence de l'air et favorise la dissipation d'énergie par convection, i.e. flux de chaleur sensible ou latente (Cosandey, 1993). La répartition de la végétation peut aussi avoir des conséquences sur le bilan d'évaporation (Johnson, 1991). La condition majeure pour que l'évapotranspiration soit plus importante en forêt que pour un autre type de végétation en bon état et couvrant bien le sol est qu'une quantité d'eau suffisamment importante soit à disposition des arbres, plus de 400 mm par an en moyenne. La formation pédologique doit aussi être suffisamment profonde pour que les racines des arbres puissent coloniser une épaisseur de sol leur permettant d'accéder à la réserve hydrique.

Inversement, les racines plongeantes, comme les systèmes racinaires de type pivotant, constituent des voies d'eau préférentielles à travers le sol, accélérant ainsi les transferts entre l'atmosphère, sol et sous-sol à l'échelle du bassin versant (Johnson 1987). Cet effet peut se combiner avec des changements liés à la structuration des sols par les plantes : modification de la vitesse d'infiltration, de la conductivité hydraulique des horizons de surface ou d'adsorption par les matières organiques (Sharma, 1987 ; Vernier et al., 2003). Cependant, comme le signale Cosandey (1993), une meilleure circulation de l'eau dans le sol ne joue un rôle que si elle améliore les transferts latéraux, qui jouent un rôle essentiel dans la formation des écoulements. Or les systèmes racinaires modifient verticalement le profil de sol dans la plupart des cas. Par ailleurs, la forêt ne protège pas des effets de modification des surfaces,

Figure I-1 : Interactions nappe-végétation

Schéma illustrant les interactions nappe-végétation (Le Maitre et al., 1999). Légende de l'auteur (traduction libre) : L'afforestation (ou la conversion de végétation basse herbacée vers une végétation plus dense et vigoureuse) augmente les pertes par évaporation et réduit la recharge (B versus A). Les pompages dans la nappe (C) peuvent réduire la recharge de l'aquifère et affecter la végétation des ripisylves ou des zones humides (D). Le débroussaillage réduit la perte par évaporation et augmente la recharge (F versus E). Les pompages dans la rivière ou dans les aquifères alluviaux (G) peuvent affecter la végétation riveraine par la diminution des niveaux de nappe. Les grandes phéatophytes le long des rivières ou sur les zones aquifères (H) peuvent déprimer localement la nappe, en causant, par exemple, des oscillations dans les hydrographes de décharge. La plantation d'arbres qui peuvent avoir accès à la nappe superficielle, ou l'exploitation des ressources aquifères peuvent provoquer des baisses de niveaux susceptibles de réduire la superficie et la composition en espèces des zones humides voisines (I et J).



comme par exemple, le tassement des sols. L'augmentation de la taille des gouttes par ruissellement le long des branches et des tiges peut au contraire augmenter la force de l'impact au sol, et donc accentuer la battance de certains sols forestiers dépourvus de sous-bois (*Ibid.*).

La vidange de nappe alimente les débits d'étiages. La géométrie de l'aquifère est le facteur prépondérant dans la détermination de la vitesse de décroissance des débits. Mais, dans certains cas particuliers, comme celui du plateau des Landes de Gascogne que nous abordons ici, les plantes peuvent directement prélever l'eau dans la nappe et ainsi influencer la rapidité et l'intensité de l'étiage. Le schéma repris de Le Maitre et al. (1999) résume l'impact de la végétation sur le cycle de l'eau, en particulier le lien avec la nappe phréatique (Figure I-1). Certaines plantes se sont spécialisées dans l'utilisation de l'eau aquifère aux endroits de résurgence, comme par exemple en bordure de rivière (ripisylve) ou dans les zones mal drainées où la nappe affleure (zones humides). La végétation peut ainsi, par ses prélèvements, déprimer localement la nappe. Lambert (1996) signale que dans les landes de Gascogne, la coupe rase d'une pinède fait remonter le niveau de la nappe de 0.6 à 1 m. Une étude en Floride a aussi démontré que la suppression du couvert forestier (*Pinus taeda*) dans un contexte comparable augmente de 32 à 41 cm la hauteur de la nappe par rapport au témoin (Sun et al., 2000). Inversement, la nappe est plus basse sous les couverts forestiers que sous des zones non boisées voisines (Heuperman, 1999). Par ailleurs, la percolation profonde, qui assure la recharge de la nappe, sera retardée si les pluies d'automne sont consacrées à la recharge de la réserve superficielle. L'étiage sera donc plus long et plus marqué.

1.2 Les bassins versants forestiers

Il existe trois types d'expérimentations sur les bassins versants : (1) la comparaison de plusieurs bassins versants les plus similaires possibles du point de vue de la météorologie et de la géologie, afin de comparer leur comportement hydrologique, (2) la comparaison sur un seul bassin versant des effets avant et après traitement, dans les limites où le climat reste relativement similaire entre les deux périodes, et (3) les bassins versants jumeaux (Mc Culloch et Robinson, 1993).

Andréassian (2004) en fournit une excellente synthèse, en attachant une importance toute particulière à l'impact de l'afforestation et de la déforestation sur les débits des cours d'eau. Le principe de base est simple : deux bassins versants voisins sont étudiés pendant une période de calibration, à laquelle succède une période de traitement durant laquelle les couverts forestiers sont coupés (déforestation) ou rétablis (afforestation). En règle générale, la déforestation d'un bassin versant augmente les débits annuels et le débit de base, tandis que l'afforestation les diminue. Les pics de crues et les volumes de crues sont plus importants après la déforestation, alors que l'afforestation ne semble pas avoir d'effet sur les débits de crues, cette différence de comportement a été attribuée à l'impact de l'exploitation des bois

(Fritsch, 1990 ; Cosandey, 1993). L'inter-comparaison de bassins versants doit être interprétée avec prudence, car les résultats dépendent des conditions climatiques ayant eu lieu après le traitement. De plus, des changements peuvent avoir lieu sans modification du couvert végétal, par exemple, via l'effet du vieillissement des forêts (Kuczera, 1987 ; Andréassian, 2004) ou au contraire, à cause de la modification du couvert végétal, par la réinstallation naturelle d'espèces différentes de celles qui ont été coupées au début du traitement (Hornbeck et al, 1997). Une piste de recherche proposée par Andréassian (2004) est d'utiliser les capacités des modèles pour mimer le schéma expérimental des bassins versants jumelés afin de tester l'effet des différents facteurs intervenant dans la liaison végétation-cycle de l'eau, et de mieux cibler les incertitudes.

Déjà en 1967, Penman demandait : *"Are we going to put all our energy in just measuring what happens, or shall we put a little more effort in research to find out why things happen ?"* (Mc Culloch et Robinson, 1993). Il semble en effet important d'aller d'avantage vers la compréhension des processus, au delà de la simple mesure hydrologique, qui n'a de sens que localement, afin de mieux comprendre quelles sont les interactions entre la végétation et la nappe. L'approche en "boite noire", sans analyse des processus hydrologiques à l'intérieur du système bassin versant, ne permet pas de comprendre le rôle hydrologique des forêts, afin d'appréhender quand, comment et dans quelle mesure la végétation intervient sur le cycle de l'eau (Cosandey, 1993).

1.3 Contexte et objectifs de l'étude

1.3.1 La vallée de la Leyre

La Rivière Leyre (Figure I-2), qui trouve son exutoire dans le bassin d'Arcachon représente un enjeu écologique et économique majeur. Le territoire du PNR est caractérisé par son paysage très spécifique, composé d'une mosaïque de forêts entrecoupées de grandes cultures et de zones urbaines. Ses particularités en ont fait la seule vallée en France autour de laquelle a été établi un Parc Naturel Régional (PNR). Depuis 2006, Le PNR des Landes de Gascogne et les acteurs locaux travaillent sur la mise en œuvre du SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux ; Navrot, 2006), mis en place après une période de consultation auprès des différents acteurs du territoire. Six enjeux ont été définis : (A) Améliorer la qualité des eaux en prévision du développement des activités et de l'urbanisation, (B) Assurer une gestion hydraulique satisfaisante pour les milieux et les usages, (C) Optimiser la gestion de la nappe d'eau souterraine, (D) Assurer une gestion raisonnée des réseaux superficiels pour le maintien de l'équilibre biologique et physique, (E) Préserver et gérer les zones humides du territoire, et (F) Mettre en œuvre le SAGE.

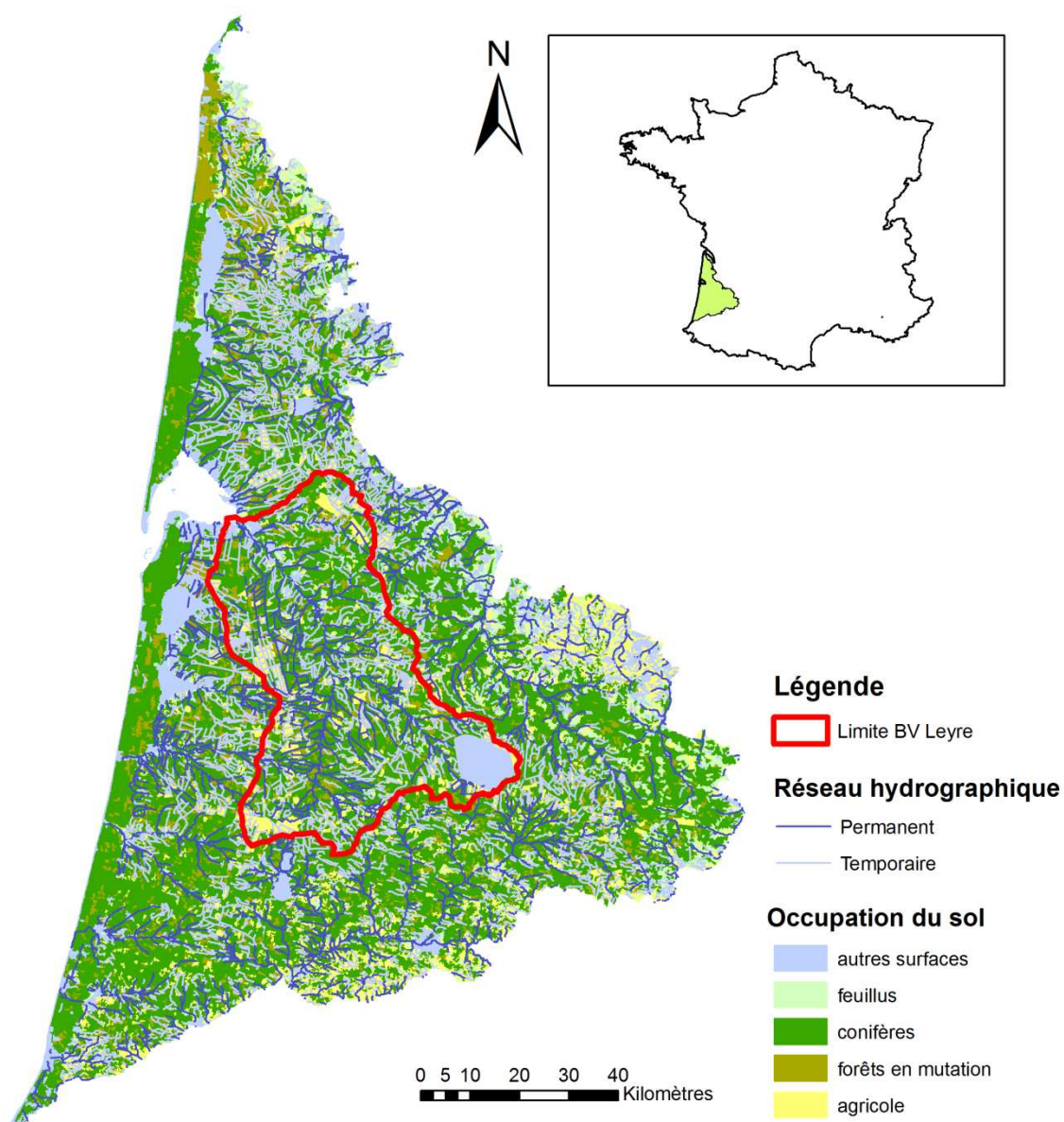


Figure I-2 : Localisation et limites du bassin versant de la Leyre (Source : Govind A., INRA).
Fond de carte : base de données Corine Land Cover 2000 (EEA) et BD CARTHAGE (IGN)

Depuis les années 60, le bassin versant de la Leyre a subi de nombreux changements. En terme d'occupation des sols tout d'abord, avec une augmentation des surfaces agricoles entre les années 70 et 90 : la Surface Agricole Utilisable (S.A.U) est passée de 7 966 ha en 1970 à 18 508 ha en 1988. Une tendance qui s'est stabilisée depuis, avec une progression de la S.A.U de 6.5% seulement entre 1979 et 1988 (Le Gars, 1992). Ces surfaces sont principalement dédiées à la maïsiculture irriguée, et avec pour conséquence des interrogations grandissantes sur la disponibilité des ressources en eau, l'irrigation utilisant pour une part importante les eaux d'aquifères superficiels comme la nappe phréatique plio-quaternaire et la nappe miocène immédiatement inférieure. Des études ont démontré que la consommation annuelle du maïs irrigué était comparable à celle de la forêt (Stella et al., 2009), et que l'utilisation de la ressource eau n'était pas problématique tant que la recharge de la nappe est suffisante (Cassou, 1992). Le principal conflit d'usage est lié aux pompages et au drainage agricole qui dépriment localement le niveau piézométrique provoquant à proximité des dépérissements forestiers (Dulong et al., 1990 ; DFCI, 1998). En second lieu, les pratiques ont été modifiées et intensifiées (raccourcissement des rotations sylvicoles en particulier). Les techniques ont changé pour les itinéraires culturaux, en particulier avec la généralisation du drainage enterré (Chossat et Laplana, 1995), et pour les itinéraires sylvicoles, avec le labour quasi-systématique en forêt. Enfin, les changements ont aussi été climatiques avec 1) la dérive environnementale discrète et continue de facteurs tels que la température - le Sud Ouest est la région ayant connu le réchauffement le plus rapide en France au cours du 20ème siècle-, la concentration en CO₂ et en ozone, les dépôts azotés,... et 2), l'occurrence d'événements climatiques extrêmes, ECE, et leurs arrières effets. Les tempêtes de 1999 et de 2009 ont marqué les esprits, ainsi que la canicule de 2003, mais les années atypiques modifient aussi le fonctionnement des écosystèmes, comme la pluviosité de 1992, et les sécheresses de 1989-91, 2002, 2005-2006 et 2010-2011. Il est donc essentiel de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique et les équilibres en jeu, afin de pouvoir comprendre et prévoir l'impact de tels changements sur l'écosystème.

1.3.2 Problématique

Le fonctionnement hydrique de la forêt de Pin maritime et son impact sur la productivité primaire ont été abordés à la fin des années 1980 par le programme international HAPEX-MOBILHY qui a livré un ensemble important de résultats sur le bilan d'énergie et l'évaporation de la forêt (André et al. 1988 ; Gash et al. 1989, Granier et al. 1990, Blith et al. 1994, pour n'en citer que quelques uns). Ces recherches ont été ensuite relayées par l'expérimentation de suivi à long terme du site du Bray (El Hadj Moussa, 1989 ; Loustau et al. 1990, 1992 ; Granier et Loustau, 1994) qui a servi de support à toute une suite de projets européens et vu les premières mesures de flux par eddy covariance (Diawara et al. 1991 ; Berbigier et al. 1991, 2001). Dans les années 60-80, une série de thèses ont été menées à l'Université de Bordeaux I, pour caractériser l'hydrogéologie de la nappe plio-quaternaire et

de la nappe miocène dans les Landes de Gascogne (Denis, 1962 ; Vouvé, 1962 ; Besbès, 1963; Astié, 1964 ; Saint-Pé, 1966 ; Boyrie, 1972 ; Cottinet, 1974). A l'échelle du bassin versant, dans les années 90, le couplage des modèles ISBA et MODCOU a été appliqué à plusieurs grands bassins versants du Sud-ouest (Habets, 1998), mais les résultats pour le bassin versant de la Leyre ont été moins concluants que ceux obtenus pour les autres bassins versants de l'étude, du fait des spécificités de la zone (réseau hydrologique jeune, influence du souterrain prépondérante, nappe peu profonde en relation avec la végétation).

De nombreux modèles ont été mis au point pour représenter le fonctionnement de la végétation, et en particulier des forêts (Kirschbaum et al., 2001 ; Landsberg, 2003a). Ceux qui existent pour le Pin maritime sont limités au fonctionnement des peuplements à l'échelle de la parcelle (GRAECO, Porté, 1999 ; MUSICA, Ogée et al., 2003). Le couplage avec un modèle hydrologique apparaît comme un enjeu majeur pour comprendre le fonctionnement d'un bassin versant, en intégrant la variabilité spatiale des couverts et des propriétés de sols.

Des dispositifs de bassins versants jumelés ont été mis en place dans la région dans les années 90 par le CEMAGREF de Bordeaux, sur deux bassins versants à couverture végétale contrastée : un bassin versant uniquement forestier, le Tagon, et un bassin versant mixte (forêt et cultures), le Grand Arriou. L'objectif de l'étude était de comparer la production hydraulique et la qualité des eaux à l'exutoire. Ces travaux ont montré que les débits étaient plus importants de 30% pour le bassin versant mixte. Cet effet a été attribué à la densité du réseau d'assainissement (Beuffe et al., 2002).

Il ressort de ces études ainsi que des inventaires et observations que le fonctionnement de la pinède landaise est fortement tributaire du régime hydrique local et régional. La productivité forestière est en premier lieu différenciée par la hauteur de la nappe sous la parcelle. D'une part, il est historiquement connu que celle-ci interdit l'établissement des peuplements en absence de tout drainage ; d'autre part, elle favorise au contraire l'alimentation en eau des arbres en été. Le fonctionnement du Pin maritime est donc fortement couplé aux conditions limites de l'écosystème, la nappe phréatique qui détermine en partie la disponibilité en eau des arbres, et l'atmosphère qui fixe la demande évaporative.

1.3.3 Objectifs

Afin de mieux comprendre l'évolution récente (1980-2010) des changements de productivité de la forêt landaise et la distribution géographique de celle-ci, nous avons analysé les relations entre la nappe plio-quaternaire et le fonctionnement de la végétation forestière de petits sous-bassins versants du système Leyre-Arcachon, dans le Sud-ouest de la France. Les questions posées sont les suivantes :

- Comment caractériser les changements d'occupation des terres et l'évolution décennale de la structure d'âge des forêts et de leur productivité à l'échelle de ces petits bassins versants ? Comment les mettre en relation avec le régime phréatique ?
- Quels ont été les effets immédiats et différés des changements de biotope, climat, atmosphère, eau, etc., et des interventions anthropiques sur le fonctionnement des forêts au cours de la période 1980-2010 ? Quel est l'effet des pratiques de défrichement et coupe rase, liées à l'exploitation ou à la coupe anticipée suite à des dégâts de tempête, sur les bilans de carbone et d'eau ?
- Comment l'évapotranspiration d'écosystèmes forestiers à l'échelle de petits bassins versants peut-elle être reliée avec le régime de la nappe superficielle ?

Le premier objectif de cette Thèse était de mettre en place un dispositif de suivi hydrologique et écologique de bassins versants jumelés à l'échelle de petits bassins versants forestiers situés dans le Massif Landais, (chapitre II). Dans notre cas, le dispositif ne comportait pas de modifications du couvert végétal par un traitement volontaire, mais dans la répétition de la modification de la structure des âges par l'occurrence de deux tempêtes successives en 10 ans d'intervalle. Par la collecte de données cartographiques, numériques et statistiques existantes, une série chronologique de l'usage des terres et des classes d'âges des peuplements forestiers a été réalisée pour la période 1984- 2010 sur les deux bassins versants (chapitre III). Cette reconstitution a ainsi permis de retrouver l'évolution des stocks de carbone et de biomasse des peuplements pour les deux sites expérimentaux.

La variabilité du lien entre les forêts de pin maritime et la nappe phréatique plio-quaternaire a été mise en évidence par l'étude de la croissance secondaire des arbres pour des sites où la profondeur de la nappe était contrastée, au travers d'une étude dendroécologique à l'échelle du massif landais (chapitre IV). La compréhension des liens entre variables hydroclimatiques et largeur de cerne, de manière rétrospective, a aussi permis d'identifier les facteurs de variabilité et les facteurs limitants pour chaque type de site, en lien avec la profondeur de la nappe superficielle.

Chacun des deux sous bassins a été équipé avec un ensemble de piézomètres automatiques qui ont mesuré durant trois années consécutives le niveau de la nappe pour différents sites où la profondeur de nappe et les couverts végétaux étaient variables. Ces mesures ont permis de constituer des séries chronologiques des fluctuations demi-horaires du niveau phréatique. L'analyse des chroniques a mis en lumière des oscillations journalières qui peuvent être attribuées à l'évapotranspiration journalière et a révélé des prélèvements journaliers profonds insoupçonnés jusqu'alors (chapitre V). Une estimation de l'évapotranspiration moyenne à l'échelle du bassin versant est proposée ainsi que la fraction d'évapotranspiration prélevée dans la nappe.

La dernière partie de ce travail pose les bases d'une future modélisation couplée végétation-nappe pour le bassin versant du Bouron. La reconstitution spatiale du fonctionnement de la nappe phréatique a été entreprise en régime stationnaire puis en régime dynamique avec le modèle NEWSAM de l'Ecole des Mines de Paris (chapitre VI). Cette

phase, préliminaire, explore les facteurs déterminants du fonctionnement de l'aquifère et les flux d'eau à l'échelle de la petite région. L'effet de la recharge est en particulier testé, via une étude de sensibilité, en relation avec les différences de recharge induites par les différents types de couverts, et en particulier, l'âge des peuplements. Les points clefs à améliorer sont identifiés afin d'améliorer les modèles utilisés, et de reproduire, de façon réaliste, le fonctionnement de petits bassins versants dans la région.

Chapitre II

Présentation générale et sites expérimentaux.

'Cheshire Puss', she began, rather timidly, as she did not at all know whether it would like the name: however, it only grinned a little wider. 'Come, it's pleased so far', thought Alice, and she went on. 'Would you tell me, please, which way I ought to go from here?'

'That depends a good deal on where you want to get to', said the Cat.

'I don't much care where -' said Alice.

'Then it doesn't matter which way you go', said the Cat.

'- so long as I get somewhere', Alice added as an explanation.

Carroll, L. (Alice's Adventure in Wonderland, 1865)

II. Table des matières

2.1	Le massif forestier des Landes de Gascogne	33
2.1.1	Bref historique.....	33
2.1.2	Géographie	33
2.1.3	Climat.....	35
2.1.4	Sylviculture du Pin maritime	35
2.1.5	Stations forestières et pédologie régionale	35
2.2	L'aquifère plio-quaternaire.....	37
2.2.1	Extension régionale et traits structuraux	37
2.2.2	Litho-stratigraphie régionale.....	39
2.2.2.1	Miocène.....	39
2.2.2.2	Pliocène	41
2.2.2.3	Pléistocène	42
2.2.2.4	Holocène.....	42
2.2.3	Propriétés hydrodynamiques de l'aquifère plio-quaternaire	43
2.2.4	Dynamique régionale et relation avec la végétation	45
2.3	Sites expérimentaux.....	46
2.3.1	Situation géographique	46
2.3.2	Climat.....	48
2.3.3	Occupation du sol.....	48
2.3.4	Equipement des bassins versants.....	52
2.3.4.1	Suivi piézométrique.....	52
2.3.4.2	Suivi météorologique	57
2.3.4.3	Suivi des débits	58
2.3.5	Caractérisation du réseau de drainage	62
2.3.6	Tests de pompage	64
2.3.7	Influence de l'altos.....	66
2.4	Présentation des modèles utilisés.....	69
2.4.1	Modèle de croissance du Pin maritime GRAECO	69
2.4.2	Modèle hydrogéologique NEWSAM.....	71
2.5	Résumé.....	73

2.1 Le massif forestier des Landes de Gascogne

La forêt des Landes de Gascogne constitue le plus grand massif forestier artificiel d'Europe Occidentale, avec la particularité d'être, en grande majorité, privée (92 % ; SAGE, 2005), à l'exception des forêts de protection littorale domaniale.

2.1.1 Bref historique

Le massif forestier des Landes de Gascogne est une forêt jeune. Vers -8000 Av JC, la chênaie mixte est majoritaire, entrecoupée de zones marécageuses à végétation basse (Papy, 1981). Vers -6000 av. JC, le Pin maritime colonise les dunes côtières. Il forme des massifs plus importants vers -3000 av. JC, parfois en forêt mixte. Aux environs du XVIII^{ème} siècle, la forêt, très marécageuse en hiver et très sèche en été, semble occuper 10 000 ha (Jolly, 1993). La loi du 19 juin 1857, instaurée par Napoléon III organise et régit la mise en valeur des Landes de Gascogne, en particulier l'assainissement des sols par drainage et la mise en culture du Pin maritime, essence qui avait déjà prouvé sa valeur économique par la production de charbon, de gemme, et de piquets (Sargos, 1949). La forêt de Pin maritime occupe 900 000 ha au XIX^{ème} siècle. Les incendies sont fréquents (220 ha par an entre 1958 et 1967), mais entre 1968 et 1972, l'étendue des dégâts est particulièrement importante : 11 000 ha par an pour ces 5 années (Sargos, 1949). Les boisements détruits sont replantés à l'aide de semences ibériques, mal adaptées aux conditions locales. Ils sont exploités de manière prématurée après le gel de Janvier 1985 (Jolly, 1993). Actuellement, 1 320 000 ha sont boisés sur le massif, dont 803 000 en futaie de Pin maritime pour l'année 2006 (Colin et al., 2010).

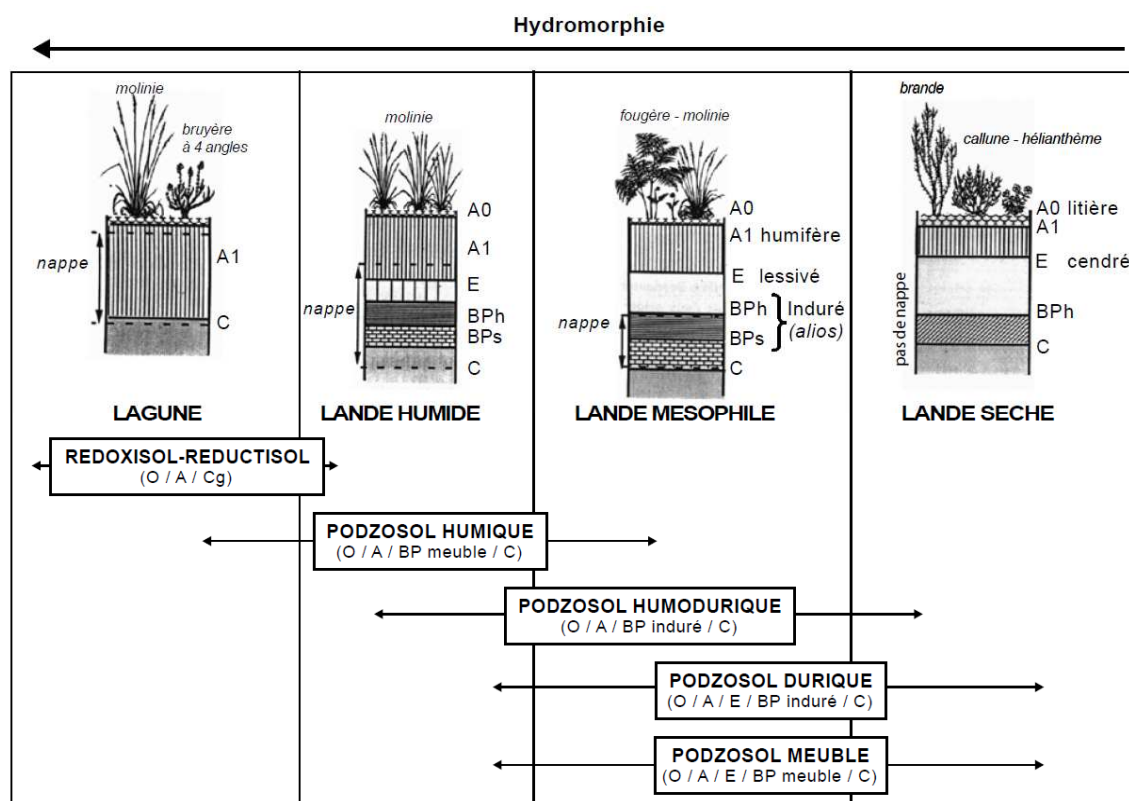
2.1.2 Géographie

Le Massif forestier des Landes de Gascogne recouvre 3 départements : la Gironde, les Landes, ainsi que le Lot et Garonne. La pente est très faible, en moyenne deux pour mille d'Est en Ouest (El Hadj Moussa, 1989). Les dunes littorales, les dunes fossiles à l'intérieur des terres, et l'incision des vallées forment les rares accidents topographiques de la région. Le réseau hydrographique de surface est jeune (Quaternaire), et la faible ramification du réseau ne favorise pas un bon drainage des sols (Enjalbert, 1960). La vallée principale est celle de la Leyre dont la source se trouve dans les Landes, formée par la confluence de la Petite Leyre et de la Grande Leyre. Sa longueur totale est de 115.9 km pour un bassin versant de 2028 km² et 82 affluents (Ruisseaux du Tagon, de Lacanau, de l'Ile, de Dubern, du Get, de la Moulette, de Paillasse, du Moulin de Lugos, de Bouron, de Ponsesquet, de la Craste, de Barrouil, du Castéra, du Nord au Sud, pour ne citer que les principaux après la confluence), dont 51% sont permanents (SAGE, 2005).

Tableau II-1 : Itinéraire technique du Pin maritime (adaptée de CRPF, 2005 ; Jacquet, 2010).

	Régénération naturelle	Semis	Plantation
Travaux préparatoires	Assainissement si nécessaire, curage des fossés		
	Travail du sol : débroussaillage, broyage des rémanents, dessouchage, labour en plein ou en bandes, fertilisation phosphatée		
Matériel végétal et mise en place	Nécessité d'une banque de semence suffisante (maintien de semenciers)	Semis en ligne : 1 à 3 kg/ha	Standard : 1000 à 1600/ha avec interligne de 4 à 4,5 m, espacement entre les plants de plus de 1,8 m
Opérations complémentaires	Cloisonnement tous les 4-5 m	1 à 2 dépressages laissant de 1000 à 1600 tiges/ha	Tailles de formation éventuelles
	Dégagements sur les lignes		
	Entretien		
1ère éclaircie	Prélèvement sélectif entre 10 et 20 ans suivant la densité et la qualité de la station lorsque la circonférence moyenne est comprise entre 40 et 60 cm), en enlevant entre 25 à 50% du nombre de tiges		
Eclaircies suivantes (3 ou 4)	Prélèvement inférieur à 40% du nombre de tiges à chaque passage (dès que le couvert se referme, soit entre 5 et 10 ans d'intervalle entre les coupes)		
Elagage	Recommandé pour la production de bois de qualité		
Récolte	Entre 35 et 50 ans (arbres d'environ 1,2 m³ de volume unitaire), peuplement final d'environ 300 tiges/ha en lande de bonne fertilité ou 250 tiges/ha en lande sèche		
	Bois d'œuvre de haute qualité : entre 50 et 60 ans (arbres élagués de plus de 1,5 m³ de volume unitaire)		

Figure II-1 : Caractérisation de la typologie stationnelle des Landes de Gascogne (Augusto, 2006)



L'orientation Nord-Ouest/Sud-Est du réseau hydrographique de surface n'est pas conforme aux pentes topographiques (Klingebiel et Legigan, 1981). Elle semble s'expliquer par la tectonique profonde le long de la faille de rejeu se trouvant dans l'axe de l'anticlinal de Villagrains-Landiras (BRGM, 1980). Ces derniers sont de forme rectiligne sur la rive gauche, et de forme plus sinueuse sur la rive droite. La Leyre et ses affluents agissent comme des agents de drainage de la nappe phréatique et, très peu comme des canaux collecteurs des eaux de ruissellement superficielles (Manaud, 1997). Au niveau de son embouchure, dans le Bassin d'Arcachon, les flux annuels de la Leyre sont d'environ 300 millions de m³ dont les 2/3 sont fournis par les nappes (*Ibid.*).

2.1.3 Climat

Le climat est de type Atlantique, avec des étés chauds et relativement secs, et des hivers doux et pluvieux. La pluviométrie présente un gradient Sud-Ouest/Nord-Est, de 700 à 1200 mm (El Hadj Moussa, 1989 ; Loustau, 1999). Le climat est tempéré par la proximité de l'Océan Atlantique, la côte étant plus chaude d'un degré en moyenne en raison de l'inertie thermique supérieure en bordure d'océan (Manaud, 1997), grâce aux vents d'ouest dominants. Ces mêmes vents d'ouest sont aussi responsables des deux tempêtes centennales qui ont sévèrement frappé le Massif en moins de 10 ans : Martin le 27 décembre 1999 puis Klaus le 24 janvier 2009, avec des pointes à 173 km.h⁻¹ relevées au Cap Ferret en 1999 et de 172 km.h⁻¹ à Biscarosse en 2009. L'intensité et la fréquence du gel sont fluctuantes : de 15 à 100 jours par an, avec des températures pouvant atteindre -24°C (janvier 1985).

2.1.4 Sylviculture du Pin maritime

La sylviculture du Pin maritime a été standardisée dans les années 80 (Mauge, 1987). Cependant, il est difficile de savoir si les préconisations sont effectivement appliquées, car les choix du gestionnaire dépendent de facteurs économiques et personnels. Le schéma classique est résumé dans le Tableau II-1. La régénération naturelle a été ajoutée aux tables classiquement données par le CRPF. En effet, depuis les deux dernières tempêtes, de nombreux petits propriétaires se posent la question d'une gestion moins dispendieuse, et il est possible qu'à l'avenir, les itinéraires techniques soient plus divers (Hazera, 2009).

2.1.5 Stations forestières et pédologie régionale

Du point de vue éco-hydrologique, les parcelles forestières de Pin maritime (*Pinus pinaster*) peuvent être regroupées en fonction du type de sol (Figure II-1, pour plus de détails sur l'alias se rapporter au paragraphe 2.3.7), des conditions de drainage et des variations de la profondeur de la nappe par rapport à la surface du sol au cours de l'année, selon les critères

définis par Augusto (2006), afin de déterminer le type de lande. Trois grands types sont distingués, identifiables par des espèces indicatrices (C.A.G., 1988) :

- La lande sèche : sur sols à nappe et à alios profonds, i.e. lorsque le niveau de l'eau est toujours sous le seuil de 2 mètres de profondeur par rapport à la surface, caractérisée par un sous-bois de bruyère cendré, *Erica cinerea*, de callune, *Calluna vulgaris* Hull., et de mousses. L'espèce indicatrice de ce type de lande est l'Hélianthème faux-alysson, *Helianthemum alyssoides* ;
- la lande humide, sur des sols naturellement mal drainés, à nappe superficielle, i.e. lorsque la profondeur moyenne de l'eau est proche de 0.3 m en hiver, caractérisée par un sous-bois de molinie, *Molinia caerulea*, de bruyère ciliée, *Erica ciliaris*, et de bruyère à quatre angles, *Erica tetralix*. Les trois espèces sont toutes indicatrices ;
- la lande mésophile, intermédiaire entre les deux précédentes, sur sol moyennement drainé, où le niveau de la nappe fluctue entre 1 et 2 m, avec un sous-bois d'ajonc d'Europe, *Ulex europaeus*, de brande, *Erica scoparia*, de bruyère cendrée, *Erica cinerea* et de fougères, *Pteridium aquilinum*.

2.2 L'aquifère plio-quaternaire

2.2.1 Extension régionale et traits structuraux

L'extension du triangle landais, c'est-à-dire l'aire où le Pin maritime est cultivée (données IFN), est sensiblement similaire à l'extension de la nappe plio-quaternaire (Figure II-2), comme on peut le voir sur la carte produite par le BRGM (Seguin et Baudry, 2002). Cette nappe s'étend sous 13 500 km² et ne représente que le premier feuillet, libre, à porosité de matrice, d'un système hydrogéologique épais de 1500m (Roux, 2006). Elle est sub-affleurante sur 68 % du territoire (0 à 5m), constituant ainsi une réserve en eau facilement utilisable par la végétation. La profondeur par rapport à la surface du sol peut être néanmoins plus importante, à l'aplomb des zones de reliefs, tel que le cordon dunaire en bordure côtière (jusqu'à 63m au dessous de la surface du sol). Les avis divergent sur les modifications hydrologiques dans les landes au cours des dernières décennies. D'après le BRGM, les mesures piézométriques disponibles à l'échelle du massif ont montré peu d'évolution depuis les années 60-70 (Corbier et Karnay, 2010). Pour d'autres, on constate un assèchement des landes : moins 49% de zones humides/marécageuses entre 1983 et 1995, et abaissement de la hauteur de nappe pouvant aller jusqu'à 44% (Porté, 2000). L'IFN constate un recul marqué des landes humides à partir de l'analyse des cartogrammes des types de landes issus des inventaires départementaux de troisième et quatrième cycle (rapport Expertise « *Avenir du Massif Landais* » du groupe de travail N°4 : Territoire, Eau, Biodiversité, qui s'est réuni de septembre à novembre 2009¹).

Le massif de la Grande Lande constitue une région naturelle dont les caractéristiques hydrogéologiques sont bien individualisées (Klingebiel et Legigan, 1981). Cet ancien bassin sédimentaire mésozoïque (à partir du Jurassique), tertiaire et quaternaire, est composé d'une succession d'horizons d'origines variées, qui accueille une structure hydrogéologique en feuillets d'extension et d'épaisseurs inégales, séparés par des horizons peu ou pas perméables (Roux, 2006). Il est intéressant de connaître l'histoire géologique de la région à partir du miocène pour comprendre la litho-stratigraphie locale. Ces assises sont monoclinales et peu perturbées par l'orogénèse pyrénéenne dans la partie Nord-Orientale où se situe notre étude. Elles se relèvent cependant à l'Est, à cause de l'anticlinal miocène de Villagrains-Landiras.

¹ Ce groupe de travail a réunit les participants suivants : CRPF, INRA, Agence de l'eau Adour – Garonne, ARDFCI, GIP ATGeRI, CEMAGREF, CIPM, Chambre d'agriculture, CSRPN, Conseil Général des Landes, ETF Aquitaine, FNCOFOR, DIREN, DRAAF, DDAF 33, DDEA 40, FCBA, FIBA, IEFC, IFN, ONCFS, PNR, Préfecture des Landes, SAFER, SEPANSO, UPPA et le GIP-ECOFOR

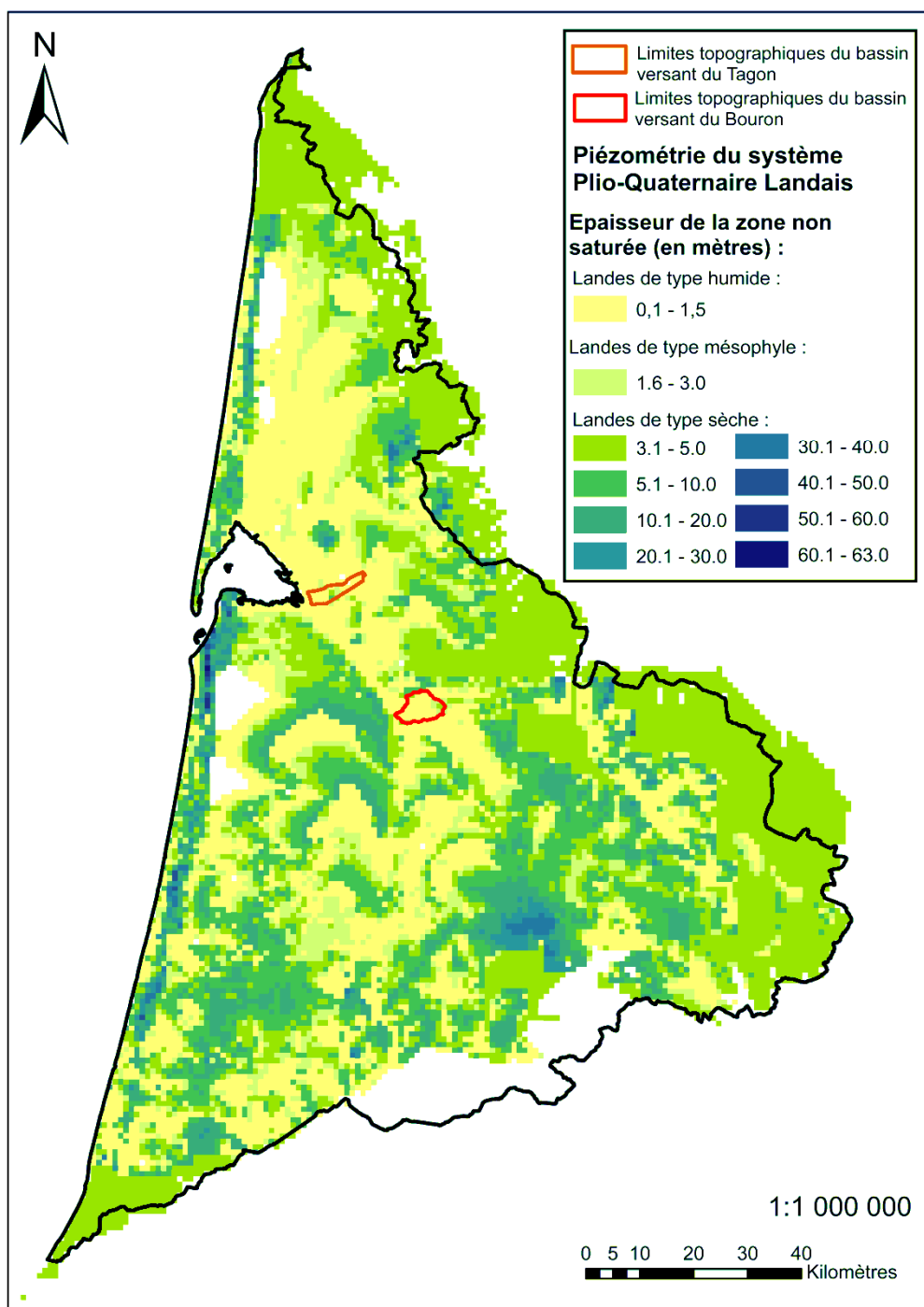


Figure II-2 : Extension du système plio-quaternaire landais et épaisseur de la zone non-saturée
 (Source : BRGM et IFN)

A cette même période, le Bassin aquitain émerge totalement. Le toit du miocène, qui constitue le mur de l'aquifère plio-quatenaire, détermine la limite entre une sédimentation jusque là marine et une sédimentation désormais uniquement continentale. Cela se traduit par la disparition des calcaires et des argiles fossilifères, remplacés par des dépôts détritiques terrigènes de plus en plus siliceux au pliocène. Issus de l'érosion de la jeune chaîne de montagnes pyrénéennes et des contreforts du Massif Central, ces sédiments sont transportés puis déposés par l'important réseau hydrologique superficiel qui traverse alors le centre de l'Aquitaine d'Est en Ouest, entraînant le comblement du Golfe aquitain. Ces apports se ralentissent puis s'arrêtent au cours du pléistocène par suite des défluviations au centre des Landes. Les remaniements se multiplient avec l'entraînement des éléments fins et argileux, soit vers la mer par les petits fleuves côtiers, soit vers l'intérieur du continent par les vents de poussières.

A la fin du pléistocène, le climat très froid du dernier stade glaciaire (Würm) a pour conséquence une aridification partielle de la région qui favorise l'éolisation du Sable des Landes et sa dispersion sur l'ensemble du triangle landais. La zone est alors une vaste étendue subdésertique. Mais le réchauffement et l'humidification du climat postglaciaire permet le développement de la végétation qui stoppe la mobilité des sables. Aux interfluvies, zones mal drainées, se forment des lagunes et tourbières. Cet ensemble sédimentaire, appelé aussi complexe intermédiaire du plio-pléistocène, constitue l'intégralité de l'aquifère plio-quatenaire.

2.2.2 Litho-stratigraphie régionale

L'histoire géologique mio-plio-quatenaire peut se décomposer en 6 séquences majeures (Tableau II-2). Ces séquences peuvent être suivies par différents dépôts plus ou moins contemporains (holocène). Les cartes géologiques et leur notice, établies sur la région, ont été utilisées pour rédiger cette synthèse (Alvinerie, J. & Gayet, J., 1973 ; Capdeville, J.P., 1992 ; Karnay, G., 1993 ; Platel, J.P., & Dubreuilh, J., 1991 ; Platel, J.P., 1992), ainsi que la mise à jour réalisée en 2010 par Corbier et al., introduisant des changements dans le référentiel stratigraphique.

2.2.2.1 Miocène

Le miocène marin est constitué, de bas en haut, de calcaire gréseux, de grès ou faluns bleus, de sables glauconieux et enfin de sables fauves ou verts, et/ou d'argiles sableuses. La signature de ces formations est la présence de dépôts coquilliers fossilifères.

Tableau II-2 : Faciès des séquences virtuelles majeures identifiées sur l'ensemble landais.

Miocène	m4 m5	<u>Séquence 1 : Sables fauves et Glaises bigarrées (Miocène moyen à supérieur)</u> - Sables fins à grossiers, fauves ou verdâtres, fossilifères - Lignites (type Arjuzanx) - Argiles ou glaises bigarrées
Pliocène	p1	<u>Séquence 2 : séquence de Solférino (Pliocène inférieur)</u> - Sables et graviers beiges plus ou moins altérés (roux) - Argiles et sables organiques bruns foncés - Lignites (type Solférino)
	p2	<u>Séquence 3 : séquence de Mézos (Pliocène moyen)</u> - Sables à graviers blanchâtres kaoliniques - Argile silteuse blanche kaolinique à taches rouilles - Lignites (type Mézos) ou parfois matière organique - Argile silteuse, gris-bleutée à rouille, à rares graviers
	p3-IV	<u>Séquence 4 : formation d'Onesse (Pliocène supérieur)</u> - Sables blanchâtres et graviers argileux - Sables argileux micacés et argile gris-bleue sombre - Lignites (type Mimizan) ou matière organique - Argile silteuse gris-bleutée et micacée
	p3-IV	<u>Séquence 5 : formation de Beliet (Pliocène supérieur)</u> - Graviers et sables blancs kaoliniques - Argile gris-bleue à marbrures rouilles (Argiles de Brach)
Pléistocène	NF	<u>Séquence 6 : formation de Castets et du Sable des landes stricto sensus</u> - Sable grossier blanchâtre fluviatile - Argile grise à débris organiques et lignites (type Castets) - Argile et sables grisâtres - Sable fin éolisé

Seule la dernière formation sera étudiée. Elle correspond à la séquence 1, elle-même décomposée en 2 périodes stratigraphiques : le serravallien (miocène moyen) et le tortonien (miocène supérieur).

Durant le serravallien, il faut distinguer deux sortes de formations, qui passent progressivement de l'une à l'autre d'ouest en est : la première, celle des sables fauves, continentale, et la seconde, celle des sables verts, marine. La puissance de cette formation est comprise entre 4 et 35 m.

Au cours du tortonien, une couche d'épaisseur plus ou moins importante (1 m à Meynieu et jusqu'à une vingtaine de mètres près de St Symphorien et Le Tuzan, où elle affleure) d'argile ou de glaise ocre à brune s'est sédimentée. Elle peut être discontinue, voire absente, soit dans le cas de certaines zones anciennement élevées, soit parce qu'elle a été érodée par les dépôts supérieurs. Certaines notices confondent ce dépôt avec le m4 sous l'appellation de m4-5. Cette formation a été altérée par des phases de pédogénèse qui ont donné naissance à de grandes marbrures jaunes à roses. Parfois, des lignites sont associées à la base de la formation.

2.2.2.2 *Pliocène*

2.2.2.2.1 *Pliocène inférieur à moyen*

Les dépôts de cette période stratigraphique sont regroupés sous l'appellation de formation d'Arengosse, symbolisée par la lettre *p* sur les cartes géologiques de la région. Elle comprend 2 séquences successives : la séquence 2, inférieure, dite de Solférino (*Sf* ou *p1*), et la séquence 3, supérieure, dite de Mézos (*Mz* ou *p2*). Elle est parfois séparée des alluvions anciennes par une carapace ferrugineuse, qui constitue ce qu'on appelle les « garluches » qui semblent être associées à des exutoires de nappes. Sa puissance est comprise entre 0 et 50 m, et la couche d'argile supérieure peut atteindre 10 m d'épaisseur. Elle est cependant souvent incomplète sur la feuille de St Symphorien. Sur la carte géologique d'Hostens le type *p1*, qui se trouve autour de la ville d'Hostens, est principalement constitué d'argile noire à lignites.

2.2.2.2.2 *Pliocène supérieur*

Autrefois attribuées au pléistocène inférieur, la formation d'Onesse (séquence 4) et la formation de Belin (séquence 5) sont, depuis Karnay et Corbier, 2008, attribuées au pliocène supérieur. La première, correspond à un dépôt de sables fins blanchâtres plus ou moins argileux et graveleux, et peut être surmontée d'argile gris-bleutée. On la distingue de la formation de Belin, très graveleuse, dont le diamètre des graviers peut atteindre 20 mm. La formation de Belin disparaît peu à peu au Nord-Est de la carte de Parentis et passe progressivement aux sables fins argileux blancs. Cette formation affleure en tranchées au

Moulin du Moine, sa puissance totale va de quelques mètres à l'Est à 40 m à l'Ouest. De grosses différences altimétriques entre des sondages très proches (en particulier dans la zone comprise entre Cavernes et Lembarras) prouve l'existence d'un hydrodynamisme chenalissant.

La teneur en argile kaolinique est en général comprise entre 5 et 20% et augmente vers le toit de la formation jusqu'à 35% parfois. Cependant, certaines zones au Sud du Moulin du Moine renferment au contraire moins de matrice argileuse (moins de 5%).

De fines lentilles d'argile plastique, verdâtres à blanches, et de sable argileux gris-noir, peuvent s'inter-stratifier dans le sommet de cette formation.

Sur la carte d'Hostens, le Quaternaire commence avec les formations *F* et *F1*, alluvions anciennes de la Garonne, et dont la description correspond globalement à la formation d'Onesse.

Sur la carte d'Audenge, une autre formation est datée aux environs du pléistocène inférieur, et s'intercale avec la formation de Belin, la formation des Gravieres de l'Entre-deux-Mers. Elle est composée d'argiles silteuses pédogénétisées (Argiles de Brach) et de sables graveleux à matrice argileuse ocre. Ces dépôts sont limités à l'angle nord-est de la feuille d'Audenge, au Nord de Pierroton, et donc sont absents sur les bassins versants du Tagon et du Bouron.

2.2.2.3 Pléistocène

Le pléistocène définit la séquence 6. Cette séquence correspond à des sables grossiers blanchâtres fluviatiles, appelés formation de Castets, surmontée par une dernière assise de sables clairs éoliens, le Sable des landes au sens strict (s.s), qui dérive de la première formation par reprise éolienne et recouvre l'ensemble des Landes de Gascogne d'un manteau uniforme. L'ensemble a une puissance comprise entre 2 m et plus d'une vingtaine de mètres. La partie éolisée ne représente que 2 à 3 mètres de l'épaisseur totale.

Une podzolisation affecte le sommet de cette formation, avec la formation d'un alios gréseux de couleur ocre à brun-noir, discontinu, riche en oxyde de fer (15 à 20%) de 20 cm à quelques mètres d'épaisseur. Localement, on observe des argiles plus ou moins sableuses, organiques, vertes, principalement composées de kaolinite accompagnées de traces d'illites, ainsi que des petits bancs de lignites.

2.2.2.4 Holocène

Ces dépôts constituent l'ultime phase de comblement du plateau landais. Certains dépôts correspondent à des alluvions récentes présentes en amont et dans le delta de la Leyre, ou bien encore dans la vallée du Ciron (*Fyz*, aussi appelées T sur la feuille de Parentis et de St Symphorien). Ils sont composés de rares graviers, de sables fins organiques, d'argile grisâtre, de limons ou vases sombres, voire de tourbe noire. Les autres dépôts sont des remaniements éoliens, tels les édifices dunaires à l'intérieur du pays (*Dya*). Leur forme est grossièrement parabolique, amiboïde, et leur dénivelé ne dépasse pas quelques mètres. Ces dunes sont

visibles notamment le long de l'autoroute A63 entre Salles et Belin, et au sud de Marcheprime.

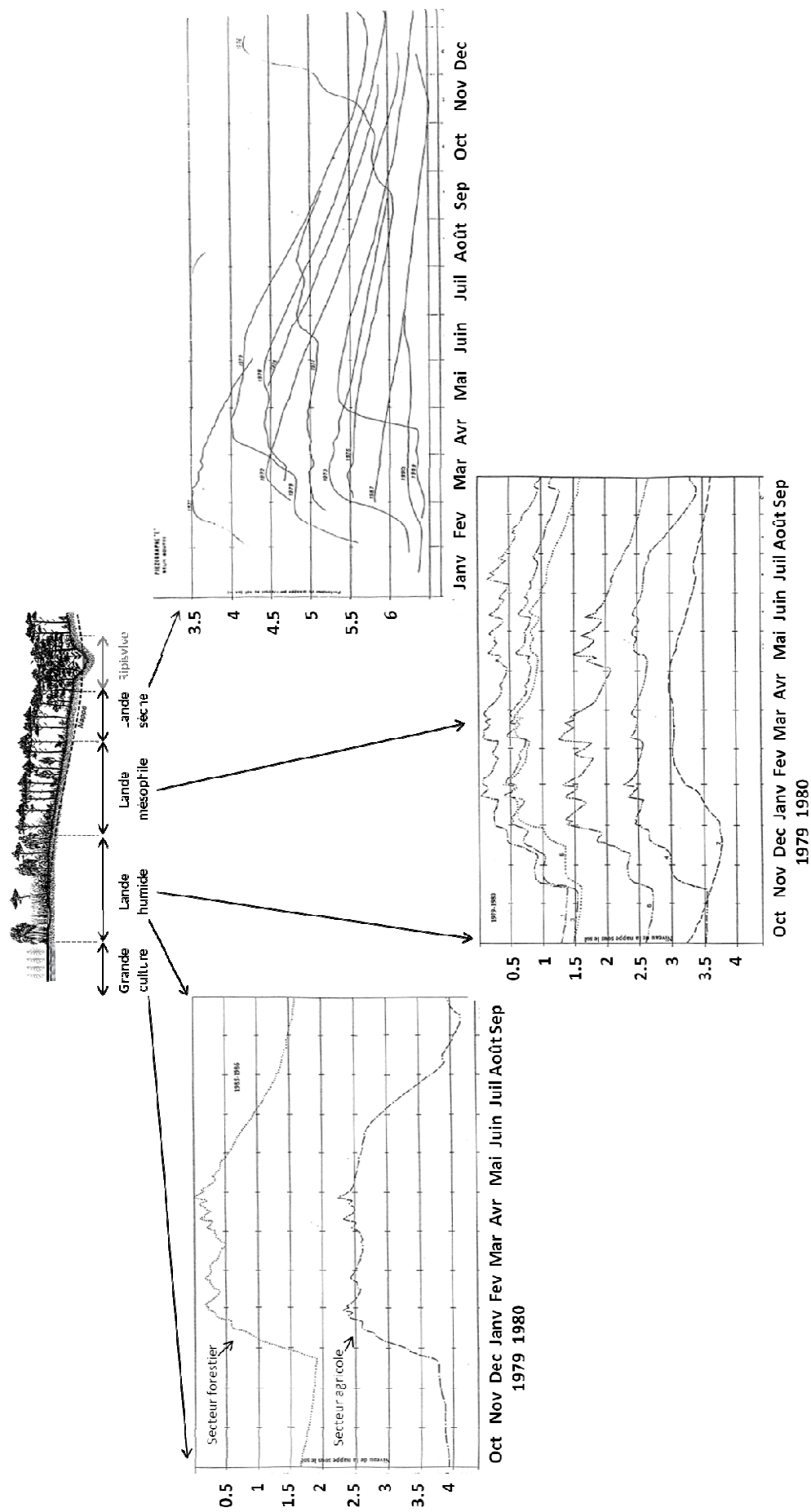
2.2.3 Propriétés hydrodynamiques de l'aquifère plio-quaternaire

Un nombre important de documents techniques ou universitaires concerne la quantification des propriétés hydrauliques de l'aquifère sableux plio-quaternaire. Compte tenu de la variabilité lithologique des formations, des méthodes employées ou même de la qualité de ces rapports, les résultats sont assez variables.

L'encyclopédie des Aquifères et Eaux souterraines en France publiée par le BRGM (Roux, J.C., 2006) donne des valeurs génériques pour le massif landais égales à 14% pour la porosité efficace, et une perméabilité (K) moyenne de $0,2 \cdot 10^{-4}$ m/s, allant localement, dans les formations graveleuses, jusqu'à $1 \cdot 10^{-2}$ m/s. La variabilité de la perméabilité pourrait donc atteindre jusqu'à trois ordres de grandeurs.

L'important travail de compilation de données réalisé par Lehuy, C., 1995 et Saint-Marc, A., 1992, sous la direction de Chossat, J.-C mérite un regard attentif. Dans ces deux rapports, l'ensemble des mesures réalisées par les 25 thèses en hydrogéologie recouvrant l'ensemble des landes de Gascogne et rédigées dans les années 60-70, a été réuni en un seul jeu de données, soit 497 mesures effectuées au perméamètre à charge constante (en laboratoire sur échantillon) et pour différentes profondeurs, réparties sur 210 points géographiques, ainsi que 50 mesures sur forage, par pompage longue durée et interprétation à l'aide de la méthode de Theis, sur autant de sites. Il faut cependant être critique vis-à-vis des valeurs obtenues : l'échantillon peut être légèrement remanié dans le cas d'une mesure en laboratoire, les conditions expérimentales en règle générale sont floues, les calculs peu détaillés et il est supposé que les valeurs de transmissivité (T) sont calculées à partir de la hauteur crépinée du forage, qui ne correspond pas toujours à la hauteur saturée totale de la formation aquifère puisque le substratum de la nappe n'est pas toujours atteint par le forage. De plus, cette base de données aurait été plus exploitable si les types de sols correspondants avaient été mentionnés. Ainsi, il eût été plus aisé d'expliquer la variabilité de ces mesures. D'après le jeu de données ainsi constitué (547 valeurs), l'ordre de grandeur de K est compris entre $1,6 \cdot 10^{-5}$ et $7,6 \cdot 10^{-4}$ m/s, la valeur moyenne est égale à $1,7 \cdot 10^{-4}$ m/s plus ou moins $1,3 \cdot 10^{-3}$ m/s et à $2,8 \cdot 10^{-4}$ m/s plus ou moins $1,7 \cdot 10^{-4}$ m/s pour la méthode au perméamètre. Ces valeurs sont compatibles avec celles mentionnées par Roux, 2006, et se situent plutôt dans sa fourchette basse.

Figure II-3 : Relation niveau de la nappe phréatique et type de végétation (adapté de Boutet et Petit, 1981 ; Aigrot, 1992)



Une étude réalisée en 2010 par le BRGM par Corbier et Karnay récapitule les valeurs disponibles pour les paramètres hydrodynamiques à l'échelle du bassin versant de la Leyre, en fonction des différents types de formations traversées. Ils citent plusieurs mesures réalisées dans le complexe intermédiaire plio-quaternaire :

- dans la formation d'Argengosse (p1 et p2), au lieu-dit du Muret (X=347794, Y=1939418) : T est égal à $1,6 \cdot 10^{-3}$ m²/s et K à $3,2 \cdot 10^{-4}$ m/s, et la porosité efficace à 25 %.
- dans la formation de Castets (NF), au lieu dit de Commensacq (X=346853, Y=1917449) : T est égal à $2,6 \cdot 10^{-3}$ m²/s, K à $1,15 \cdot 10^{-4}$ m/s, S à $2,55 \cdot 10^{-3}$ [-] et la porosité efficace à 13 %.
- dans la formation d'Onesse et de Belin, au lieu dit de Lavignolle (X=350127, Y=1956427) : T est égal à $5,4 \cdot 10^{-4}$ m²/s et K à $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s et la porosité efficace à 25 %.

Au regard de ces différentes études, et au vu de la gamme de variation de K dans la nature (de 10^{-1} m/s pour des sables à 10^{-11} m/s pour des granits), les valeurs semblent peu varier sur la région, en fonction des différentes formations constituant l'aquifère plio-quaternaire.

2.2.4 Dynamique régionale et relation avec la végétation

Le BRGM réalise des observations piézométriques sur la nappe plio-quaternaire depuis les années 1970. Ces mesures ont démontré la rapidité des variations de niveau de nappe et la concomitance des fluctuations pour des sites parfois très éloignés (sur plus de 100 km du nord au sud). Des différences notables ont aussi été observées sur les courbes de tarissement suivant les sites, ainsi que des variations d'infiltration en fonction de la couverture végétale et de l'épaisseur de l'horizon sableux désaturé (Aigrot, 1992). La Figure II-3 résume les observations faites sur les différents types de landes (voir paragraphe 2.1.3).

Sous couvert forestier en lande humide, au printemps, l'évapotranspiration des strates végétales peuvent abaisser le niveau de la nappe jusqu'à 1 ou 2 centimètres par jour. Les enregistreurs montrent que la vidange hydrodynamique est réduite hors influence de la végétation. Sous couvert agricole en lande humide, la vidange est plus faible que sous couvert forestier au printemps. Puis, durant la période d'irrigation, la situation s'inverse et la baisse de la nappe devient plus importante en landes humides agricoles, sous l'effet des pompages. Cependant, pour ces dernières, les pluies d'automne rechargent rapidement la nappe, à contrario des sites sous couverts forestiers, dont la canopée intercepte une grande partie des précipitations à cette période de l'année (15 à 20% ; Loustau et al., 1992).

En lande sèche, le fonctionnement est différent. La vidange de nappe semble se produire en régime non influencé. Les 5 à 6 m surmontant la nappe entraînent un retard d'infiltration, avec un délai de réaction pouvant aller d'un à deux mois. En revanche, l'approche d'un niveau de base virtuel ne trouve pas d'explication satisfaisante (Aigrot, 1992).

2.3 Sites expérimentaux

2.3.1 Situation géographique

Une revue bibliographique des études hydrologiques concernant la nappe plio-quaternaire et un recensement des sites déjà équipés par le BRGM et par la DIREN a permis d'identifier un certain nombre de bassins versants d'étude potentiels. Le bassin versant du Bouron (W00°80'02", N49°42'31"), considéré comme représentatif du bassin de la Leyre (Casenave, 1970), situé à la limite des départements de la Gironde et des Landes a été sélectionné dès fin 2008 (Figure II-4). L'étendue de ce bassin en surface est de 35 km². Les altitudes s'échelonnent entre 80 et 16 m NGF, et la pente est en moyenne de 1% (au maximum de 16% en amont, en raison de la présence de dunes fossiles).

Après la tempête Klaus de janvier 2009, qui a endommagé un grand nombre de peuplements sur ce bassin versant (Figure II-5), la décision a été prise d'équiper un second bassin versant, afin d'avoir une répétition du site du Bouron. Le site du Tagon (W01°03'02", N49°63'18"), en bordure du bassin d'Arcachon (Figure II-4), a été sélectionné au cours de l'été 2009, car il a fait l'objet d'études approfondies au début des années 2000, par l'INRA et le CEMAGREF. Sa surface est de 22 km². La pente est en moyenne de 1% (au maximum 4%) et les altitudes sont comprises entre 60 et 1 m NGF.

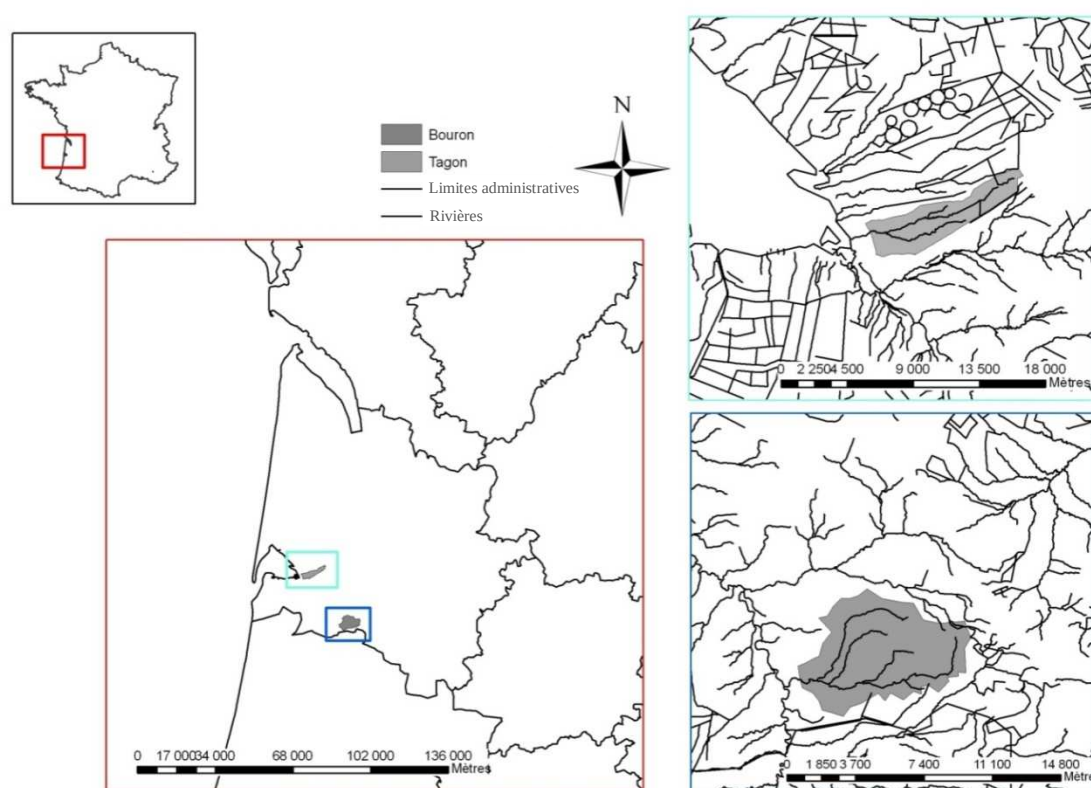


Figure II-4 : Localisation des bassins versants expérimentaux du Bouron et du Tagon

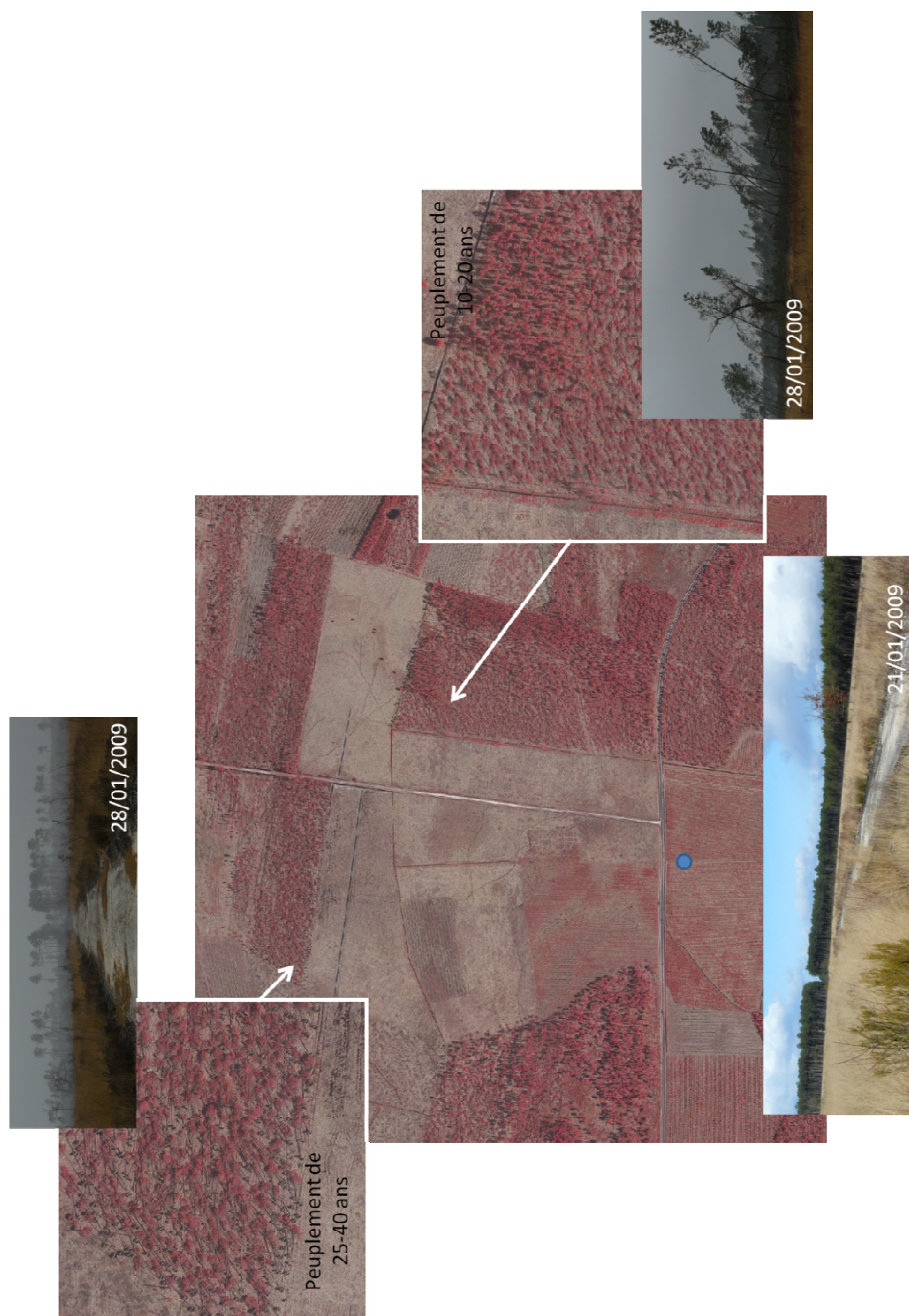


Figure II-5 : Exemple de dégâts de la tempête Klaus de Janvier 2009 sur le bassin versant du Bouron. Orthophotos RGB (INRA, 2011) prises juste après la tempête, et photos terrain prises avant et après la tempête. Le point bleu correspond au piézomètre de Balège (voir paragraphe 2.3.5.1).

2.3.2 Climat

La comparaison climatique² des deux bassins versants révèle une température en moyenne légèrement plus élevée sur le bassin versant du Tagon (+0.16°C). La pluviométrie entre les deux sites peut-être considérée comme identique. En établissant le climatogramme des deux bassins versants (Figure II-6), le climat est identique pour la période concernée entre les deux sites. Le rayonnement annuel est sensiblement identique entre les deux bassins versants : 4183.3 MJ.m⁻².an⁻¹ pour le Bouron, et 4186.3 MJ.m⁻².an⁻¹ pour le Tagon. La vitesse maximale observée des vents est aussi identique, avec en 2010, un pic à 19.7 m.s⁻¹ et 20.4 m.s⁻¹, et en 1999, 15.4 m.s⁻¹ et 14.9 m.s⁻¹, pour le Bouron et le Tagon respectivement.

2.3.3 Occupation du sol

La grande majorité de la surface totale des deux bassins versants est occupée par de la forêt (Corine Land Cover, CLC, 2000 ; Nunes de Lima, 2005) : 92% pour le Bouron et 89 % pour le Tagon. Les forêts de Pin maritime représentent 87% et 86% respectivement des surfaces forestières des bassins versants. La surface occupée par les cultures ou les prairies est faible : moins de 6% de la surface totale pour le Bouron, et moins de 2% pour le Tagon. Ce dernier est plus urbanisé avec près de 9% de surface occupée par des villes, contre 2% pour le Bouron.

L'occupation des sols est restée inchangée entre 1990 et 2000 (CLC 1990 and CLC 2000). Le Tagon étant plus proche du bassin d'Arcachon, les principaux changements sont dus à l'urbanisation, mais ceux-ci sont très faibles (0.25%). Sur le bassin versant du Bouron, les changements sont dus à la déforestation pour la mise en culture (0.45%) ou la conversion de forêts de conifères en forêts de feuillus (0.4%). Une analyse plus fine de l'occupation du sol pour les deux bassins versants à partir d'images satellites et d'inventaires forestiers est réalisée dans le chapitre II.

Le bassin versant du Tagon comporte deux types de landes : en grande majorité de la lande humide, parfois de la lande mésophile (Cormier, 2006). Le bassin versant du Bouron est plus variable : les trois types de landes sont présents, avec une grande proportion du Nord-Ouest du bassin versant en lande sèche (Besbès, 1963).

Une surface d'environ 150 km² a été utilisée autour des bassins versants pour faire le bilan des dégâts de tempêtes en 1999 (IFN, 1999) et en 2009, à partir des cartes de dégâts établies par l'IFN (1999) et le CEMAGREF (Figure II-8 et Figure II-9).

² données climatiques SAFRAN, voir paragraphe 2.3.5.2

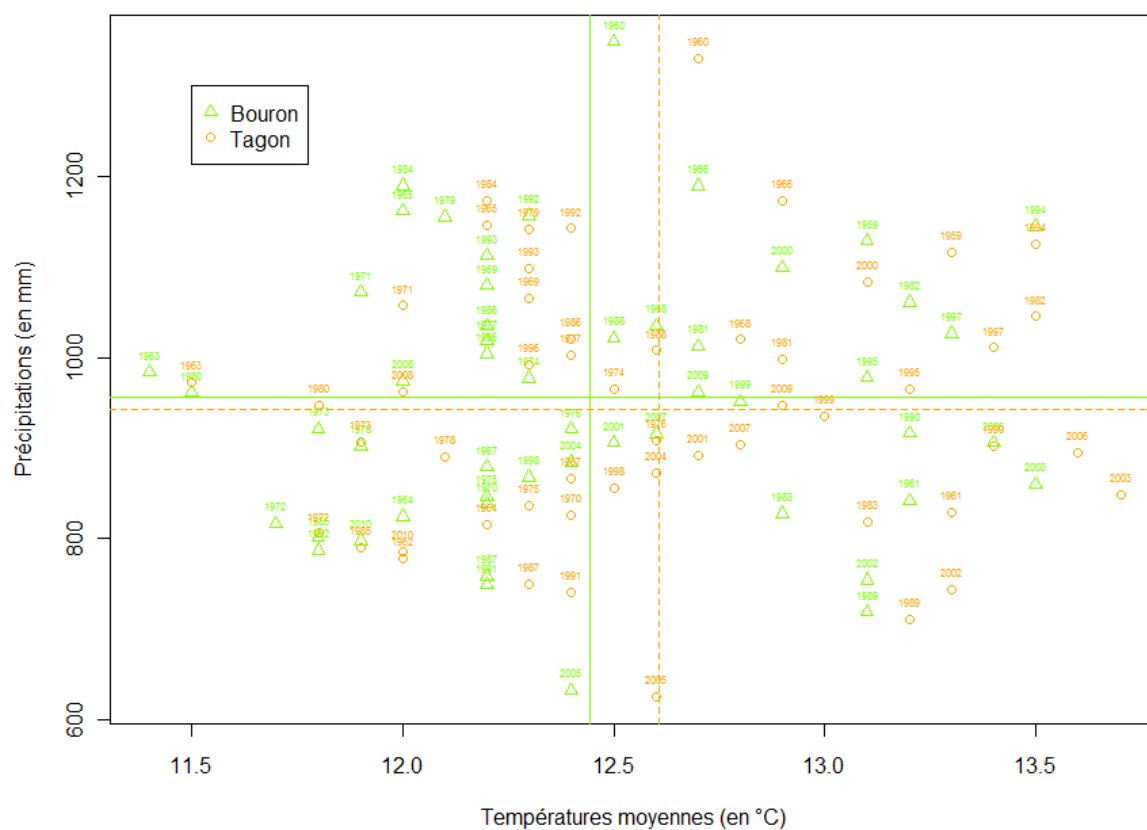


Figure II-6 : Climatogramme interannuel des deux bassins versants entre 1959 et 2010 (données SAFRAN, voir paragraphe 2.3.5.2). Les droites représentent la normale pour la période étudiée.

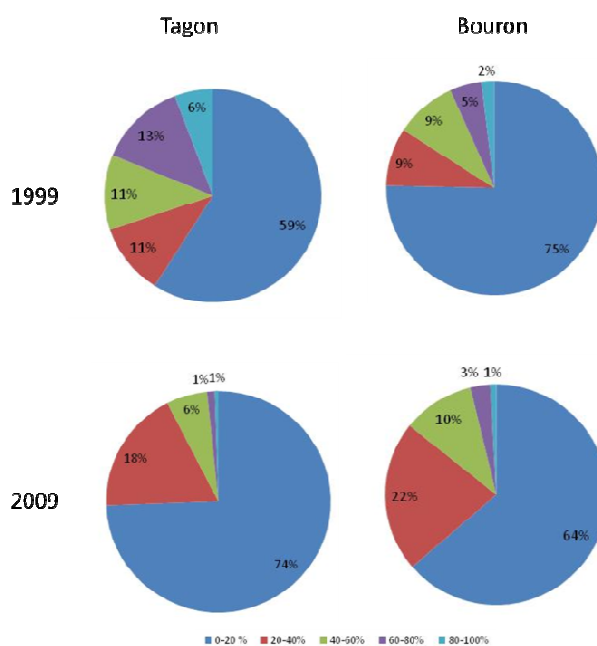
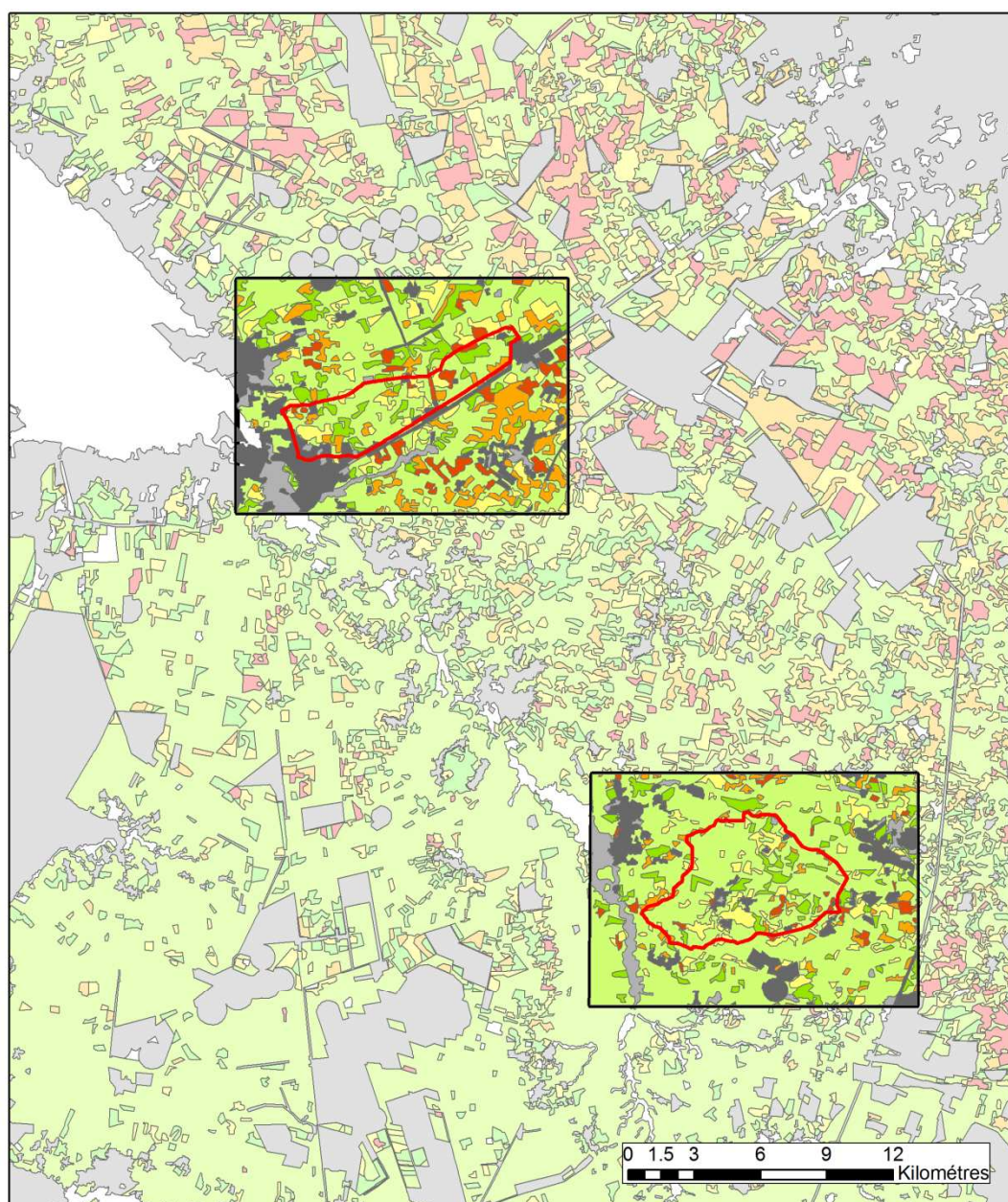


Figure II-7 : Répartition des taux de dégâts sur les bassins versants du Bouron et du Tagon, pour les tempêtes Martin (1999) et Klaus (2009).



Légende

- Limites BV Tagon
- Limites BV Bouron
- Emprise Max Tagon
- Emprise Max Bouron

Classes de dégâts sur les bassins versants (%)

- | | |
|--|---|
| 0-20 | 80-100 |
| 20-40 | Autres |
| 40-60 | Hors forêt |
| 60-80 | |

Classe de dégâts sur le massif landais (%)

- | | |
|--|---|
| 0-20 | 80-100 |
| 20-40 | Autres |
| 40-60 | Hors Forêt |
| 60-80 | |

Figure II-8 : Cartographie des dégâts en 1999 (IFN, 1999) sur les deux sites expérimentaux. BV= Bassin versant.

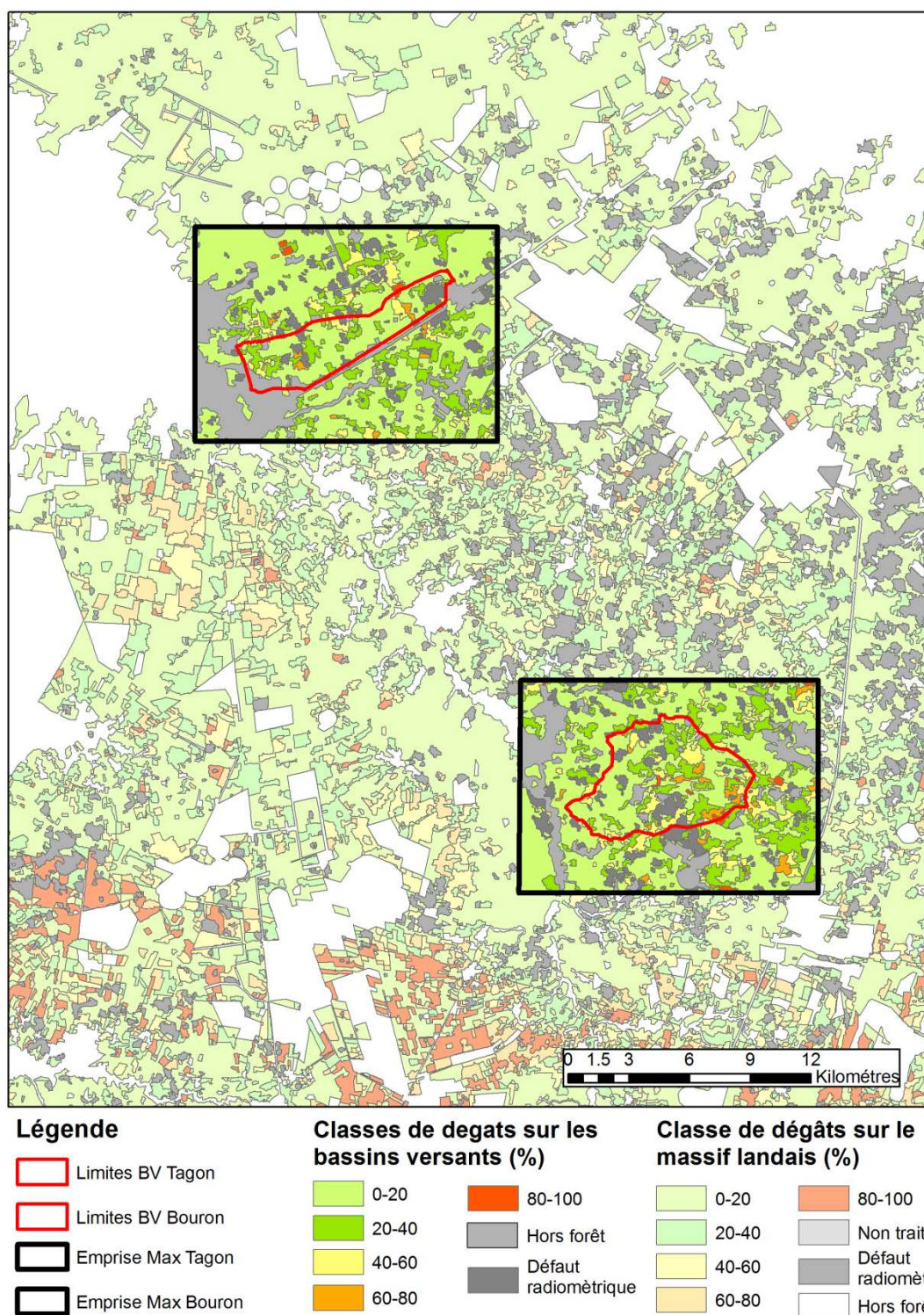


Figure II-9 : Cartographie des dégâts en 2009 (IFN/CEMAGREF, 2009) sur les deux sites expérimentaux. BV= Bassin versant.

Le bassin versant du Tagon a davantage subi de dégâts suite au passage de la tempête en 1999 (Figure II-7). En effet, le Tagon compte 32.9 % de peuplements ayant subi des dégâts supérieurs à 20 %, dont 24.2 % à plus de 50%. Le Bouron compte quant à lui, 21.3 % de peuplements ayant subi des dégâts supérieurs à 20% dont 13.6 % à plus de 50%.

En 2009, la tendance est inverse entre les deux bassins versants : avec pour le Tagon, 25.6 % de peuplements ayant subi des dégâts supérieurs à 20 %, dont seulement 7.5 % à plus de 50% et pour le Bouron, 36.4 % de peuplements ayant subi des dégâts supérieurs à 20 %, dont 14.2 % à plus de 50% (Figure II-7).

2.3.4 Equipement des bassins versants

2.3.4.1 Suivi piézométrique

Sept piézomètres ont été installés par l'INRA (Guillot et Dayau, 2010a) sur le bassin versant du Bouron (Figure II-10), pour compléter les mesures réalisées par deux piézomètres BRGM³ (exploités depuis 1998 et 2001). Deux puits privés relevés manuellement complètent l'équipement.

A l'hiver 2008, la localisation des sites était achevée, mais les conditions d'accès n'étaient pas favorables (sols trop détrempés pour le passage des engins). Après la tempête Klaus du 24 janvier 2009, un arrêté préfectoral (N°2009-124) a interdit l'accès en forêt aux personnes non autorisées jusqu'au 31 mars 2009, ce qui a grandement retardé l'installation des piézomètres, qui n'a pu se faire qu'entre avril et juin 2009.

Sur le bassin versant du Tagon, un travail a été effectué pour retrouver les forages réalisés par le CEMAGREF dans les années 2000 et pour aller reconnaître sur le terrain les puits DFCI (campagne début 2009). Sur les 28 forages réalisés par le CEMAGREF, 2 seulement sont toujours fonctionnels et utilisables. Sur les 10 puits DFCI reconnus, 5 ont été retenus pour cette étude. Ils sont tous suivis manuellement depuis. Cet équipement a été complété par l'INRA via l'installation de 5 piézomètres automatiques en septembre 2009 (Figure II-10).

Dix piézomètres ont été forés selon la technique du forage Rotary. Deux piézomètres font exception : le piézomètre d'Hillan, ancien forage agricole désaffecté (la parcelle a été reboisée depuis les années 80), et le piézomètre de Vigneau, foré à la cloche un an auparavant sur plus de 10 m de profondeur, par le propriétaire pour ses besoins en irrigation et finalement non utilisé. Autour des parois du forage, des tubes crépinés sur toute leur hauteur, de 80 cm de diamètre, ont été descendus et un massif gravillonnaire a été installé afin de garantir la tenue

³ Données disponibles sur le portail d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES, <http://www.adeseaufrance.fr/>)

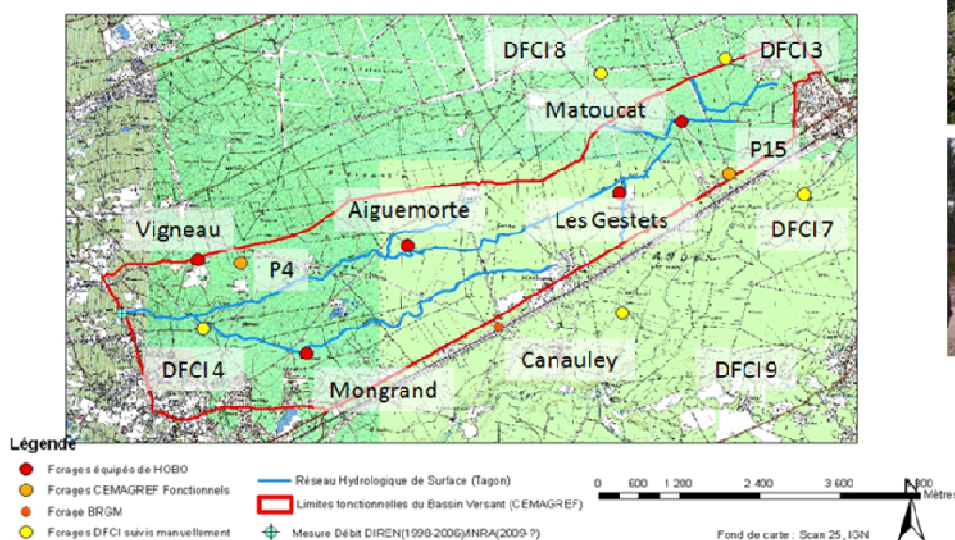
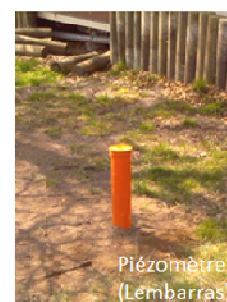
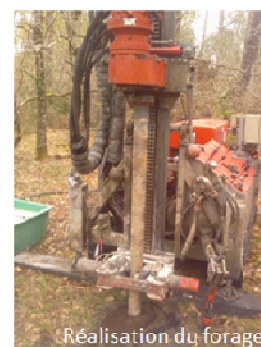


Figure II-10 : Localisation des points de suivi piézométrique et de mesure du débit sur le bassin versant du Bouron (haut) et le bassin versant du Tagon (bas).

Figure II-11 : Schéma d'installation des capteurs HOB0

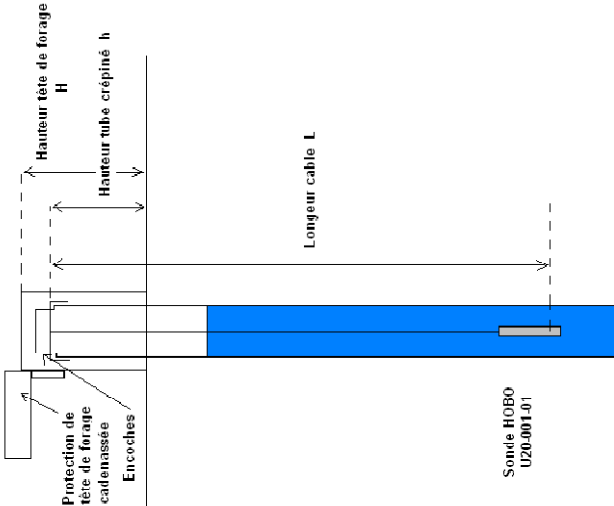


Tableau II-3 : Comptes-rendus de forages délivrés par l'entreprise ayant réalisé les travaux (M.G. Environnement, Belin-Beliet, France).

	La Serre	Lembarras	Fraysse	Les Pijoudets	Retis	Grand Col
	0.00-0.70 m	0.00-4.00 m	0.00-0.50 m	0.00-0.50 m	0.00-0.70 m	0.00-0.50 m
Bouron	0.70-2.00 m	Alios/sable couleur rouille	Sable noir	Sable	Sable	Sable noir
	2.00-4.00 m	Alios compact	Sable blanc argileux	0.50-1.00 m	Argile graveleux	Argile graveleux légèrement argileux
	4.00-8.00 m	Sable couleur rouille non compact	Sable compact /argile	Argile	Argile graveleux	Sable marron rouille clair graveleux
	8.00-9.00 m	Sable graveleux blanc /argile marron compacte	Sable blanc très compact	Sable blanc très compact légèrement graveleux	Argile marron pure très compacte	Sable blanc graveleux
		N.B : pas d'alos rencontré	1.00-3.50 m	1.00-4.00 m	4.00-9.00 m	
			3.50-4.50 m	4.00-8.00 m		
			4.50-8.00 m			
Tagon						

Figure II-12 : Précipitations et piézométrie sur le bassin versant du Bouron

Précipitations (haut) et piézométrie (bas) sur le bassin versant du Bouron entre juin 2009 et aout 2011. Les courbes en pointillés verts foncés et marrons correspondent aux piézomètres du BRGM sur le bassin versant.. La droite en pointillés noirs correspond à la limite de mesure du forage de Lembarras.

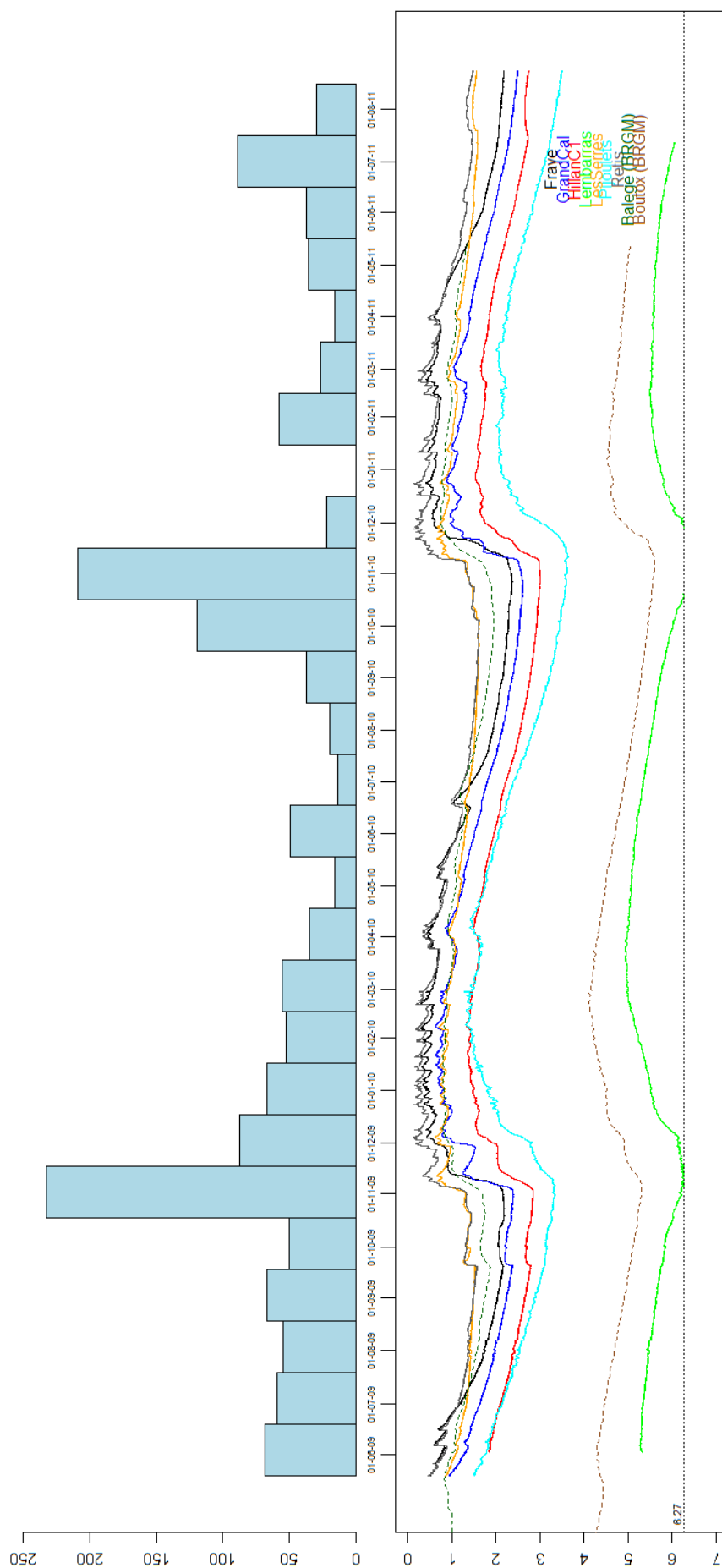
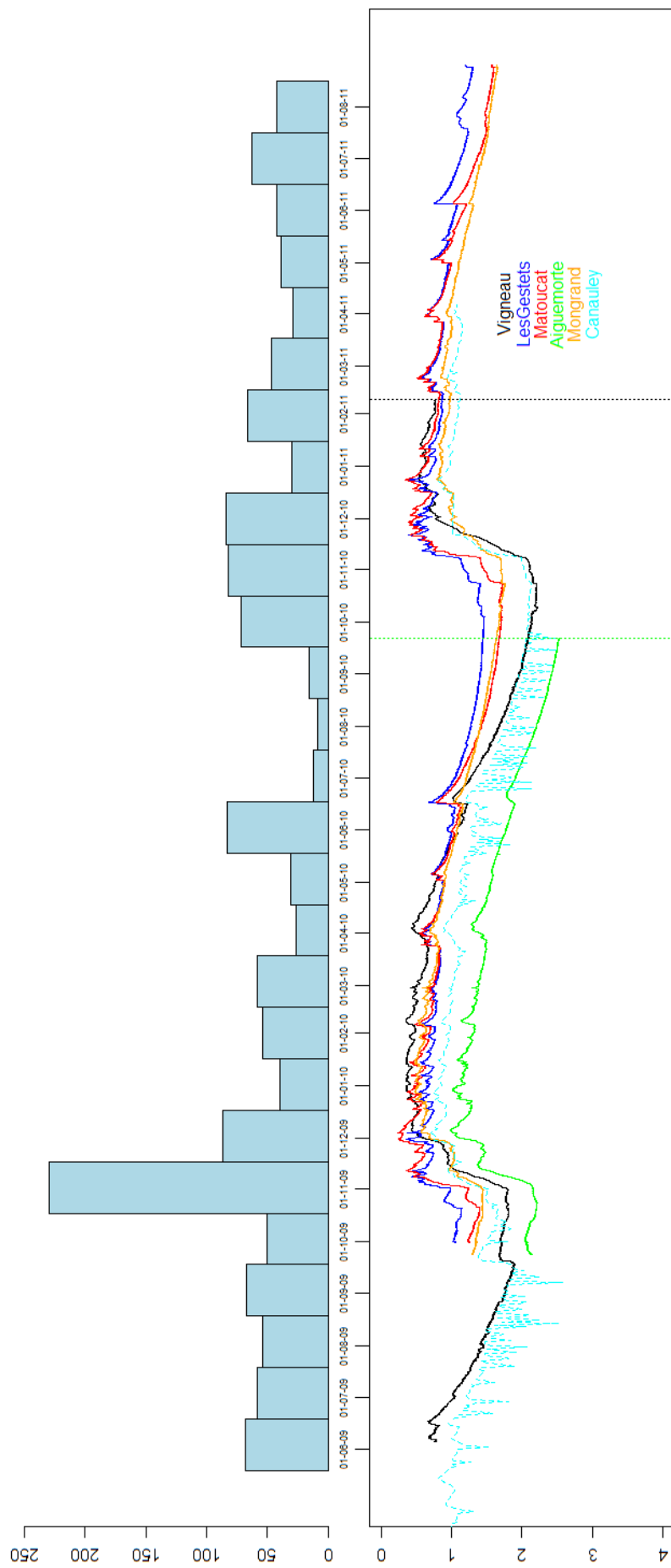


Figure II-13 : Précipitations et piézométrie sur la bassin versant du Tagon

Précipitations (haut) et piézométrie (bas) sur le bassin versant du Tagon entre juin 2009 et aout 2011. La courbe en pointillés bleus clairs correspond au piézomètre du BRGM le plus proche (hors bassin versant, voir carte 2.8). Les lignes verticales (en pointillés) de couleur correspondent à la fin des mesures pour Aiguemorte et Vigneau (vol des capteurs).



des parois du puits, ainsi qu'une protection de tête de forage cadenassée (Figure II-11). Le compte rendu des coupes de forage est visible dans le Tableau II-3.

Le piézomètre du BRGM, situé à la limite du bassin versant du Tagon (Canauley, voir Figure II-10) est sujet à des oscillations fortes pouvant dépasser le mètre. Après enquête sur place, ces prélèvements ont pu être attribués à un élevage irrigant ses prairies dans un rayon d'un kilomètre autour du forage, et dont l'installation concorde avec le début des oscillations sur la courbe piézométrique.

Les piézomètres ont été équipés d'enregistreurs de niveau d'eau, étanches, compacts et autonomes (HOBO data logger U20-001-01, Onset Computer Corporation, Cape Cod, Massachusetts, USA). La récupération des données se fait à l'aide d'un PC de terrain (Latitude E6400 ATG durci, DELL) par connexion USB-optique, via une base U-4 et à l'aide d'un logiciel spécifique, HOBOWare tous les deux fournis par la même compagnie. Une mesure de contrôle est prise à chaque visite (au moins une fois par mois) à l'aide d'une sonde de mesure Hydrosen Typ010 (Silex International, Ennery, France). Le traitement des données issues des capteurs est détaillé plus loin (voir Chapitre IV). Les données collectées sont visibles pour le Bouron en Figure II-12 et pour le Tagon en Figure II-13. Les données sont décrites avec plus de détails au chapitre IV et V.

Le nivellement des forages, i.e. la côte NGF au niveau du terrain naturel pour chaque piézomètre, a été déterminé au centimètre près avec un Leica SmartStation, station totale TPS⁴ et GPS⁵ avec GNSS⁶ intégré. Lorsque le couvert était trop dense, l'opérateur a réalisé une mesure dans un endroit dégagé, puis a progressé au théodolite par cheminement jusqu'au piézomètre. Ces travaux ont été réalisés par une entreprise spécialisée (Société d'Etudes Topographiques Informatisées, S.E.T.I., Bordeaux, France).

2.3.4.2 *Suivi météorologique*

Une station météorologique légère a été installée sur chaque bassin versant. La température et la pression barométrique sont suivies sur chaque bassin versant avec un capteur HOBO data logger U20-001-01 (Onset Computer Corporation, Cape Cod, Massachusetts, USA). La pluviométrie est suivie depuis octobre 2009 sur les deux bassins versants par lecture directe (SPIEA 1650-02, Benoit Plastique, France), complétée depuis janvier 2010 par des mesures automatiques (Pluviomètre à auget basculeur 3029, Precis Mecanique, France).

En complément de ces données in-situ, les données SAFRAN⁷ ont été utilisées (Quintana-Segui et al., 2008 ; Vidal et al., 2010). Ces données sont produites par Météo-

⁴ TPS : Theodolite Positioning System

⁵ GPS : Global Positioning System

⁶ GNSS : Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites (systèmes GPS et GLONASS)

⁷ Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige

France (Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM) au pas de temps horaire et couvrant la France à une résolution de 8 km sur une projection Lambert-II étendue (Le Moigne, 2002). Les données issues de l'interpolation spatiale avec pondération en fonction de la distance sont disponibles au format binaire, enregistrées comme une suite de points dans un vecteur à une dimension. Les valeurs disponibles sont : température (degrés Kelvin), précipitations solide et liquide ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), vitesse du vent à 2 mètres (m.s^{-1}), humidité spécifique (kg.kg^{-1}), rayonnement solaire incident (W.m^{-2}) et rayonnement infrarouge descendant (W.m^{-2}). Les avantages de ces données météorologiques sont indéniablement la régularité et la continuité des données (pas de données manquantes), ainsi que leur disponibilité depuis 1958.

2.3.4.3 Suivi des débits

2.3.4.3.1 Bassin versant du Bouron

Les débits du Bouron sont suivis par la DIREN depuis 1967 au lieu dit Le Moulin du Moine, sur la Route de Boutox (Figure II-10). La station est équipée d'un piézomètre papier relié à une station qui transcrit en analogique la mesure des hauteurs d'eau (Figure II-14). Des jaugeages sont effectués régulièrement par la DIREN (Sonde électromagnétique Nautilus, Ott, Allemagne). Les enregistrements sont disponibles sur la base de données HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>).

Le débit de base du Bouron est de 100 L.s^{-1} (Figure II-17). Le débit minimal enregistré sur la période de mesure est de 70 L.s^{-1} (novembre 1981) et le débit maximal enregistré est de 5430 L.s^{-1} (janvier 1994).

2.3.4.3.2 Bassin versant du Tagon

Une station complète a été équipée par la DIREN en 1996, sous le pont de la Départementale D3, à Biganos (Figure II-10). L'installation a consisté en la mise en place d'une échelle limnimétrique sur une paroi du pont (point stable et non évolutif) dont le nivellement du zéro de l'échelle a été vérifié en novembre 2010 (4.966 m NGF, mesure S.E.T.I, voir 2.3.5.1), ainsi qu'un barrage bas qui établit un contrôle artificiel. Il s'agit d'un déversoir à paroi mince constitué d'une plaque métallique dont la crête présente une arrête découpée en V. Ce type de contrôle est noyé sous les gros débits mais fournit une bonne relation hauteur-débit pour les débits moyens à faibles.



Figure II-14 : Photographie de la station de mesure des débits du Bouron, au Moulin du moine (visite avec la DIREN le 12/03/2008)



Figure II-15 : Photographie de la station de mesure des débits du Tagon, à Biganos.

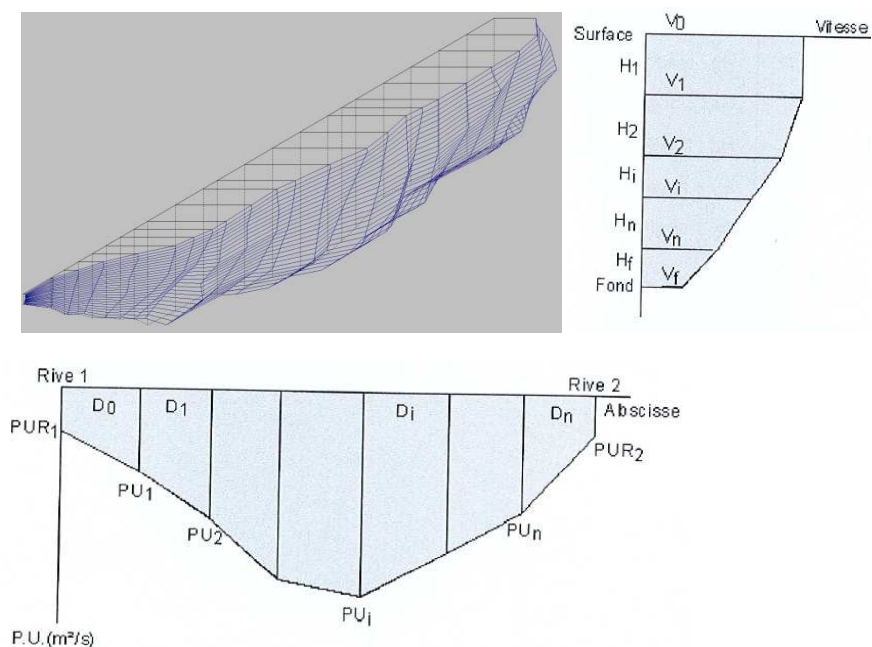


Figure II-16 : Lignes de courant en amont de l'échelle limnimétrique, endroit retenu pour le jaugeage en routine. Graphique obtenu à l'aide du logiciel BAREME. A gauche, schéma d'une verticale de mesure, en bas, schéma de la section de mesure (DREAL Rhône-Alpes, 2009).

Le suivi des hauteurs d'eau était réalisé par une sonde Paratronic CNR (Paratronic, France), reliée à une centrale d'acquisition de type CR2M (ce type de matériel a maintenant été repris par la société Alcy, France) installée sur une passerelle au dessus du cours d'eau. Elle enregistrait la pression hydrostatique (différence entre la pression totale et la pression atmosphérique) selon deux cadences de mesures en fonction d'un seuil (en période de basses eaux, enregistrement d'une mesure toutes les 20 minutes, en période de hautes eaux, enregistrement d'une mesure toutes les 30 minutes). Une hauteur d'eau moyenne, pondérée sur la journée, était ensuite retenue (une valeur par jour, traitement via le logiciel ALANA, Alcy, France).

Les mesures ont été interrompues de 2005 à 2009, date de la reprise de la station par l'INRA. La totalité des installations a été récupérée (Figure II-15) sauf le matériel utilisé pour la mesure des hauteurs (Guillot et Dayau, 2010b), qui est désormais un enregistreur Solophène (Alcy, France). Il s'agit d'une centrale à ultra-sons immergée (US-I), facile à mettre en œuvre et d'une grande sensibilité (1 mm). La sonde est programmée pour un enregistrement de la hauteur d'eau toutes les heures. Une mesure de contrôle, assurant la continuité des données entre les mesures avant 2005 et après 2009, est réalisée sur l'échelle limnimétrique à chaque passage.

Le débit de base du Tagon est de 10 L.s^{-1} (Figure II-18). Le débit minimal enregistré sur la période de mesure est de 1 L.s^{-1} (août 2002) et le débit maximal enregistré est de 5430 L.s^{-1} (janvier 1994).

Les inconvénients majeurs de ce site sont : (1) le lit n'est pas rectiligne sur environ 100 m en amont et en aval du site de mesure et (2) le lit du cours d'eau présente des risques d'affouillement ou/et pour une partie du lit de comblement.

Des mesures de jaugeage contemporaines ont été réalisées. La section de jaugeage choisie se trouve à une distance minimale de 0,30 m en amont du seuil (distance en amont égale à 3 fois la profondeur de l'eau à l'emplacement du contrôle, au niveau le plus haut pour lequel il est dimensionné). La largeur du cours d'eau à cet endroit est de 3.4 mètres. Les lignes de courant sont en tous points parallèles entre elles et sont normales à la section de mesure. Les courbes de répartition des vitesses dans la section sont régulières dans les plans horizontaux et verticaux (Figure II-16). La section est dépourvue de végétation aquatique.

Les vitesses sont mesurées à l'aide d'un compteur électromagnétique d'Hydreka, modèle 801, en même temps que les profondeurs. La saisie du jaugeage et le calcul du débit instantané sont réalisés à l'aide du logiciel BAREME (Bechon P-M., DREAL Rhône-Alpes). Ce logiciel est utilisé en routine pour la saisie et le dépouillement des jaugeages, la gestion des courbes de tarage et l'approvisionnement de la banque HYDRO. Il est basé d'abord sur le calcul des vitesses sur chaque verticale selon la méthode de la section moyenne (voir Figure II-16).

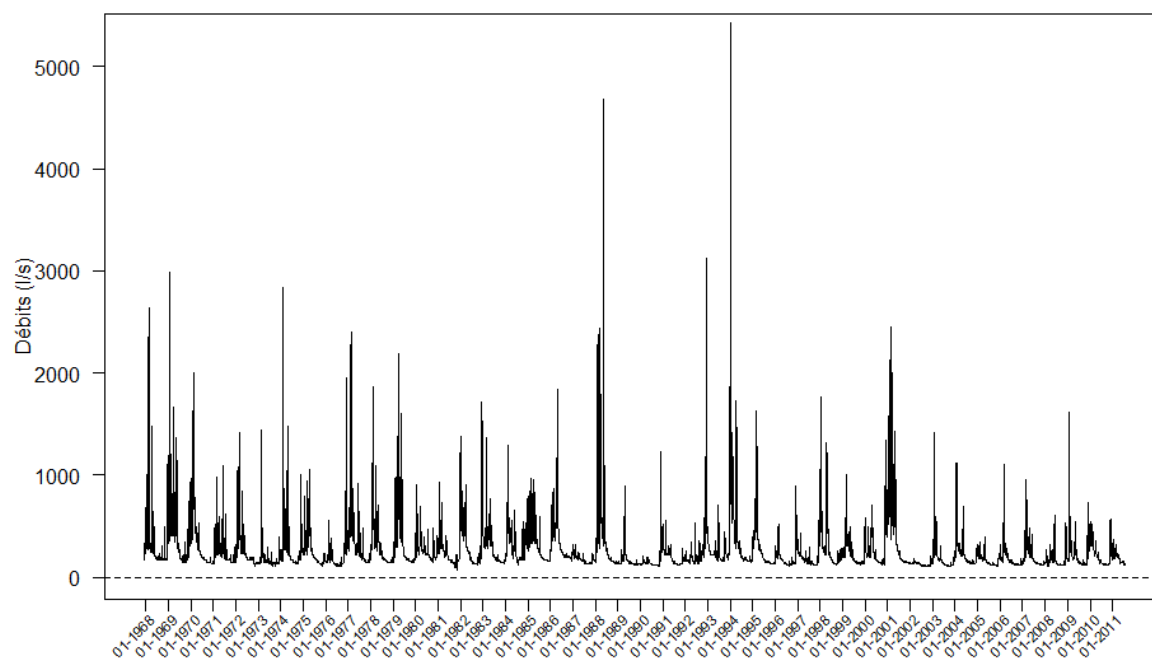


Figure II-17 : Débits du Bouron de 1996-2011.

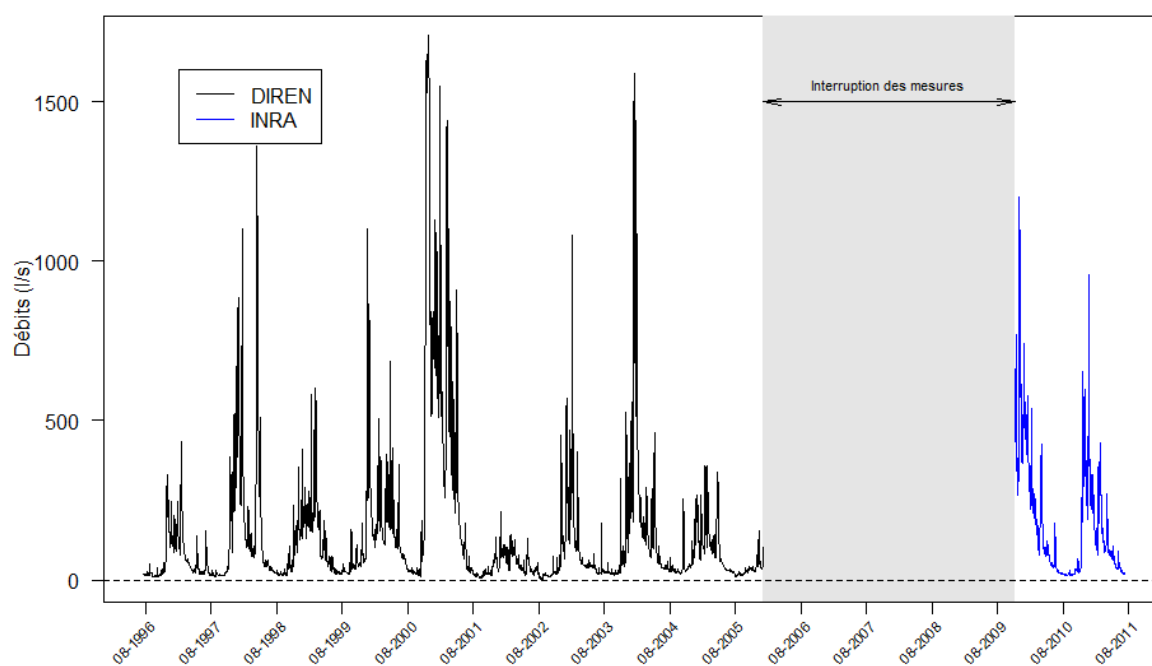


Figure II-18 : Débits du Tagon de 1996-2011.

Après un premier jaugeage de contrôle, nous avons pu déterminer que le nombre et l'espacement des verticales ne sont pas critiques. En revanche, le nombre de points par verticale influence fortement le calcul du débit instantané sur la section de jaugeage. Un minimum d'une quinzaine de verticales est réalisé (l'intervalle entre deux verticales successives ne doit pas dépasser 1/20 de la largeur totale). Elles doivent être réparties de façon à définir au mieux les variations du lit du cours d'eau ainsi que le gradient horizontal de la vitesse.

Cinq jaugeages ont été effectués pendant la durée de cette étude, malheureusement, les mesures réalisées échantillonnent mal la gamme de variabilité des débits et deux mesures sont douteuses. Par conséquent, les données de jaugeages réalisés par la DIREN ont été utilisées. Dans le cas de la rivière du Tagon, le lit de la rivière est instable, avec des déplacements de matériaux entre l'été (dépôts) et l'hiver (exportations). L'eau relativement chargée en limons, présentant des débris de toutes sortes dans le courant. Par conséquent, la section de tarage a pu être modifiée. Il semble cependant y avoir une bonne correspondance entre les débits mesurés par la DIREN avant 2005 et les débits calculés à partir des hauteurs mesurées depuis 2009 (Figure II-18).

2.3.5 Caractérisation du réseau de drainage

Les observations réalisées sont (Guillot et Dayau, 2010c) : présence d'un ouvrage (type, largeur), localisation GPS, largeur du cours d'eau (jusqu'à 5 mesures si variable), hauteur d'eau (jusqu'à 5 mesures si variable), vitesse en surface (jusqu'à 5 répétitions par mesure et jusqu'à 5 mesures si variable). La localisation et l'altitude des points ont été mesurées à l'aide d'un GPS Trimble, équipé d'un terminal TSCE Nomad 800GL et antenne GPS de haute précision Trimble Zephyr (moyenne de 10 points à chaque emplacement). Les données ont été post-traitées sous PathFinder Office Software (Trimble, Sunnyvale, USA) afin d'obtenir une précision métrique.

Le réseau hydrographique du Bouron a été observé sur 46 points observés pour un réseau de 31 km, soit en moyenne un point tous les 675m. La campagne a été interrompue par la tempête Klaus de janvier 2009, par conséquent, l'interprétation de la hauteur d'eau dans la rivière est impossible (Figure II-19) En règle générale, de l'amont vers l'aval, les bras s'élargissent. Cependant, le faciès du cours d'eau est très variable de l'amont vers l'aval, certains bras nommés « crastes » sont d'anciens drains, considérés dans la nomenclature SANDRE⁸ comme des affluents. Il arrive que certains drains soient plus actifs que les bras de rivières eux-mêmes, trop encombrés et mal entretenus.

⁸ Service d'Administration National des Données et Référentiels sur l'Eau (<http://sandre.eaufrance.fr/>)

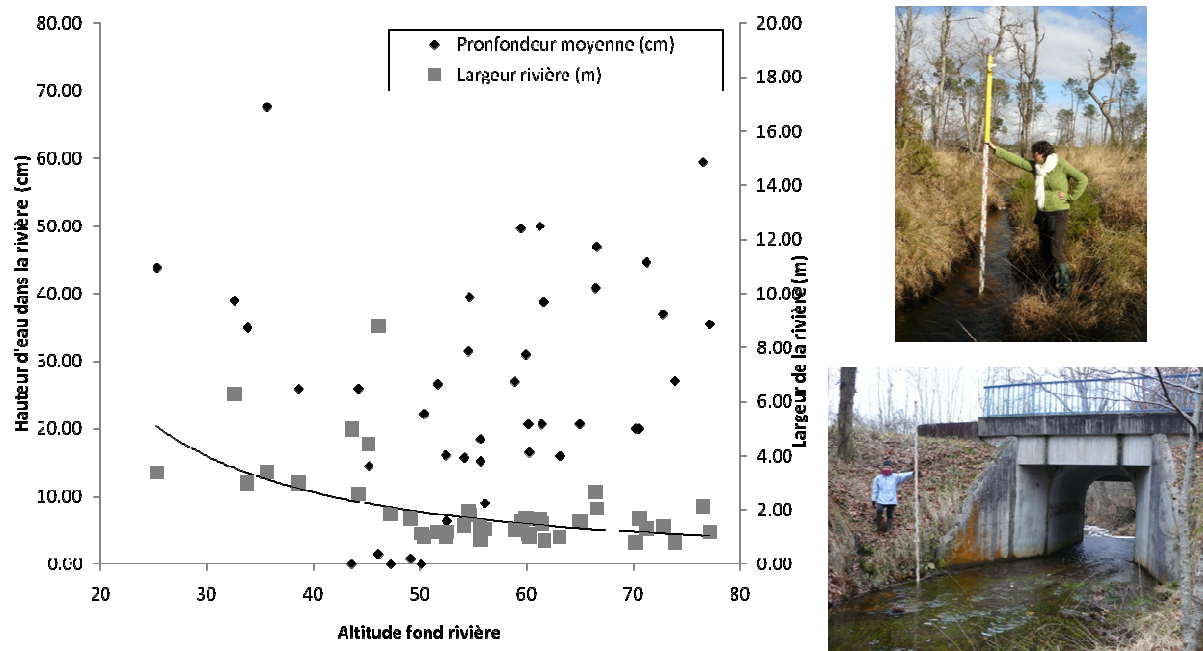


Figure II-19 : Résultats de la campagne de caractérisation du réseau de drainage pour le Bouron. L'altitude du fond de la rivière est donnée en côte NGF et est représentative de la distance à l'exutoire (pente Est-Ouest). Les photographies sur la droite illustrent la variabilité des faciès du cours d'eau.

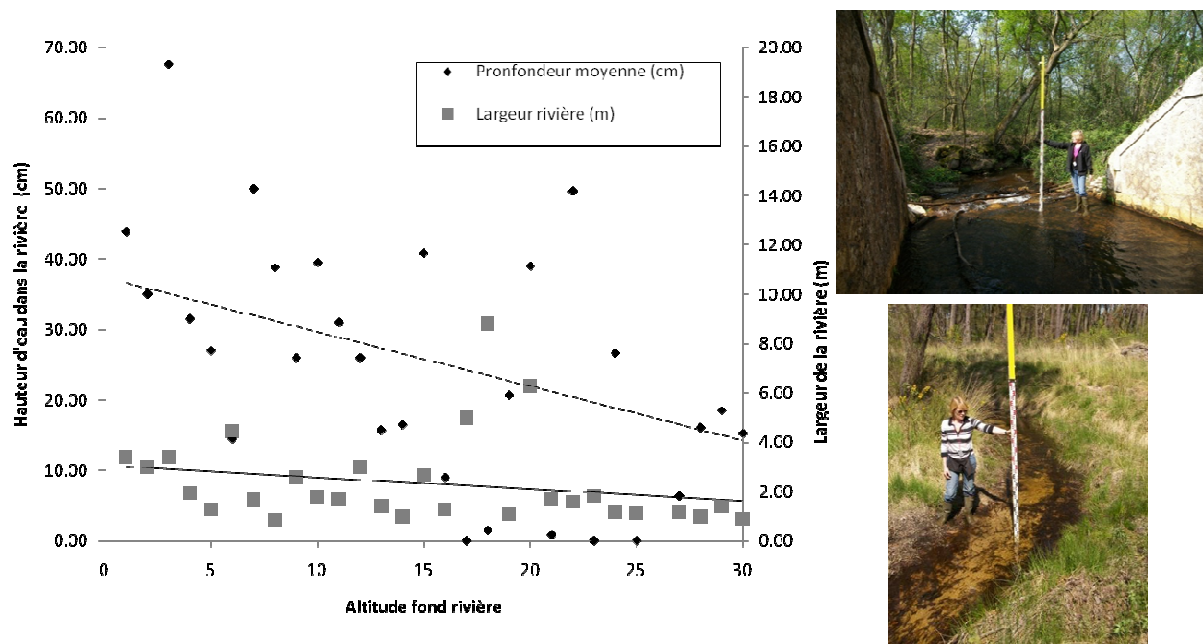


Figure II-20 : Résultats de la campagne de caractérisation du réseau de drainage pour le Tagon. L'altitude du fond de la rivière est donnée en côte NGF et est représentative de la distance à l'exutoire (pente Est-Ouest). Les photographies sur la droite illustrent la variabilité des faciès du cours d'eau.

Le réseau hydrographique du Tagon a été observé sur 31 points pour un réseau de 21.7 km, soit en moyenne un point tous les 700 m. La campagne a été réalisée en 3 jours consécutifs sans pluie (avril 2009). Les données de hauteur d'eau dans la rivière sont tout de même assez variables (Figure II-20), car comme sur le Bouron, l'état du cours d'eau dépend beaucoup du mode d'entretien. Plus on se rapproche de l'aval, plus la rivière est large et profonde. Le réseau de drainage de ce bassin versant est en général mieux entretenu que celui du Bouron et plus accessible.

Cette campagne a permis de corriger les erreurs de délimitations, basées sur la topographie, des bassins versants par étude des écoulements dans les drains. Pour le Tagon, les limites tracées par le CEMAGREF en 2002 se sont révélées exactes et non modifiées. Pour le Bouron, cet aspect sera développé en détail dans le Chapitre VI.

Un retour sur les points de mesure à l'étiage 2010 (campagne octobre 2010) a permis de mettre en évidence le caractère temporaire d'une partie du réseau hydrographique de surface pour les deux bassins versants. Au plus fort de l'étiage, seul 25% du réseau hydrographique de surface est encore actif sur le Bouron, tandis que 28% du réseau hydrographique de surface du Tagon est actif à la même période.

2.3.6 Tests de pompage

Les tests de pompage n'ont pas été réalisés dans le cadre de cette étude, mais sont issus de la littérature sur ces mêmes bassins versants. Ils constituent une source d'information pour l'appréciation des paramètres hydrodynamiques.

Quatre forages BSS⁹ sur le Bouron sont accompagnés de pompages d'essai, malheureusement, ils concernent tous l'aquifère Miocène. En revanche, un test est disponible dans la thèse de Besbès (1963), réalisé en août 1962 dans la région de Canet, sous l'épaisse lentille d'argile existant à cet endroit, dans les sables Pliocène p2 (sable argileux) et p1 (sables fins à grossiers, quartzifères). La transmissivité calculée pour la descente est de $1,43.10^{-4} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. D'après l'auteur, elle semble trop faible par rapport à la réalité, et le coefficient d'emmagasinement (S) est estimé à 0.1 [-]. Pour la remontée, T est égal à $1,568.10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ et la conductivité hydraulique (K) à $2,61.10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Cette seconde valeur de T est considérée comme la plus fiable par l'auteur.

Sur cette zone d'étude, d'après les travaux de Bèsbes (1963), la porosité totale moyenne est de 31.76% (minimum = 11.84 %, maximum = 42.8 %) et la perméabilité K est en moyenne égal à $2,92.10^{-4} \text{ m/s}$ (mesure au perméamètre, minimum = 1.10^{-4} m/s pour les sables fins argileux, maximum = $5,2.10^{-4} \text{ m/s}$ pour les graviers du Ballion).

⁹ Comptes-rendus disponibles en ligne sur la base Infoterre du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/>) : forages N°08508X0016/SEB, N°08508X0098/F2, N°08515X0006/F2 et N°08516X0001/F

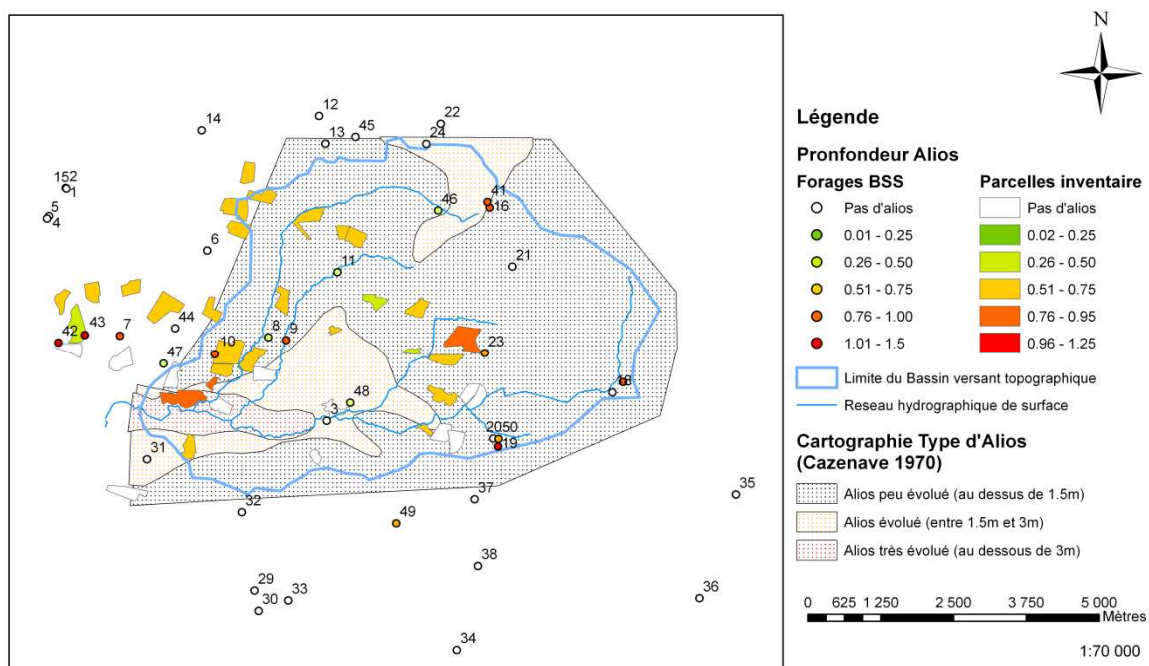


Figure II-21 : Cartographie des différentes sources d'informations disponibles sur l'alias pour le bassin versant du Bouron. Les codes des forages BSS sont repris au chapitre IV.

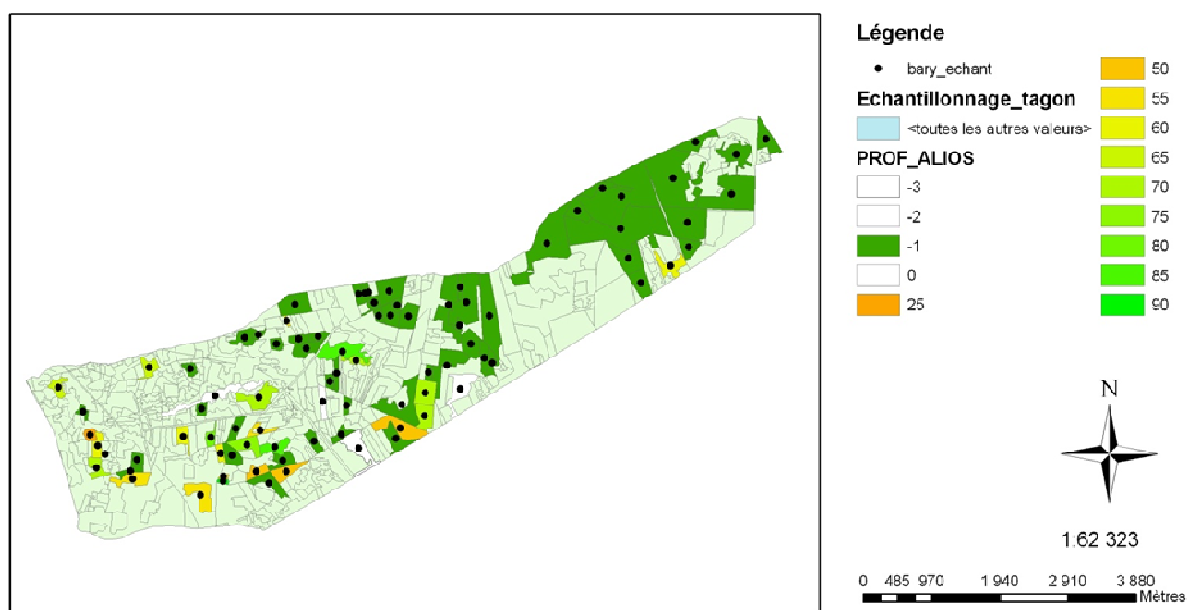


Figure II-22 : Cartographie des résultats de la campagne de caractérisation de l'alias (INRA, 2002) pour le bassin versant du Tagon.

Sur le bassin versant du Tagon, Denis (1962) a procédé à un test de pompage dans la zone du bassin versant du Tagon, sans préciser ni le lieu, ni les coordonnées géographiques, ni le type de sol. En moyenne, T est égal à $5,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, S à $5,65 \cdot 10^{-3}$ et K à $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$. L'auteur estime que la valeur de T est sans doute réaliste, mais pas la valeur de S . La porosité totale moyenne est de 28.8% (minimum = 20 %, maximum = 40 %) et K en moyenne est égal à $2,85 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ par mesure au perméamètre.

2.3.7 Influence de l'aliol

L'aliol doit sa formation à la migration et l'entraînement par les battements de nappe, de complexes organiques (acides humiques), liés à la présence d'un humus de type mor ou moder, phénomène caractéristique dans les sols acides à faible activité biologique. Il ne doit pas être négligé, car il détermine la zone explorée par les racines, en constituant une limite discontinue, soit par sa toxicité (barrière chimique), soit par sa dureté (barrière physique), et influence la circulation de l'eau dans le sol. Trois types sont distingués (Besbès, 1963, Casenave, 1970) :

- aliol humique friable brun/noir, 0.1% à 0.8% d'oxyde de fer, rencontré dans les endroits les moins bien drainés, où le niveau de nappe ne descend pas à plus de 1.5 m de la surface en période d'été ;
- aliol ferrugineux : plus dur et moins sombre, souvent caverneux, le plus fréquemment dans les zones très bien drainées ou semi-humides ;
- garluche : grès à ciment ferrugineux et siliceux, 12-15% de fer, bien qu'il semble maintenant acquis qu'il faille classer ce dernier type à part, certains auteurs s'accordant à dire qu'il n'a pas la même origine et correspondrait plutôt à des « carapaces » de nappes, antérieures aux aliols, qui semblent être associées à des exutoires de nappe.

Contrairement à ce qui est parfois écrit dans la littérature, il n'existe pas de nappe sus-aliotique soutenue par l'aliol : il s'agit bien d'un matériau poreux et l'aliol influence très peu le comportement de la nappe. Casenave le démontre par une expérience en 1970 : Il constate la formation d'une nappe temporaire, mais uniquement après un orage violent et qui ne persiste qu'au maximum quelques heures. L'aliol, bien que perméable, ralentit l'infiltration de l'eau, mais pas plus que les horizons de surfaces, riches en matières organiques.

En moyenne, Besbès trouve une perméabilité pour l'aliol friable égale à $3,6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ (perméamètre à eau à charge constante), et une porosité totale de 31,7% (mesurée par tassement). Casenave mesure avec la même méthode et sur différents types d'aliols, une perméabilité moyenne de $9 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (maximum = $2,23 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, minimum = $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$). Tous les deux s'accordent à dire que la perméabilité de l'aliol est sensiblement égale aux sables qui les entourent. Casenave démontre aussi, grâce à des mesures d'humidité du sol, que l'aliol constitue une sorte de masse spongieuse, qui peut emmagasiner de l'eau et dans laquelle l'humidité est retenue, et ce, dans toutes les conditions des stations étudiées et tout au long de l'année.

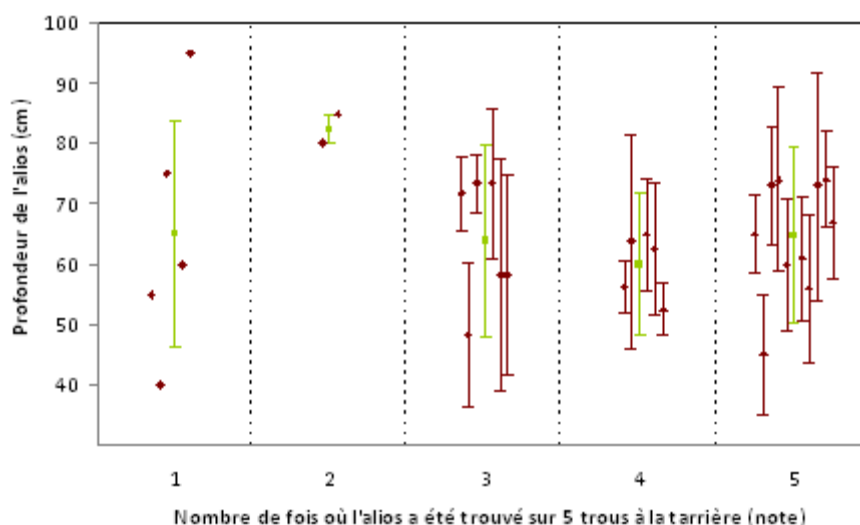


Figure II-23 : Profondeur de l'alias en fonction de sa fréquence sur le bassin versant du Bouron: en vert, la moyenne et l'écart-type pour toutes les parcelles qui ont la même fréquence ; en marron, la moyenne et l'écart-type pour chaque parcelle. Pour des questions de visibilité graphique, les valeurs ont été décalées les unes par rapport aux autres dans une même fréquence.

Une campagne a permis de caractériser la présence ou l'absence d'alias sur le bassin versant du Bouron en échantillonnant 40 parcelles dans la zone d'étude (campagne réalisée par l'Unité Expérimentale entre juillet et août 2008). Le protocole a été le suivant : un point aléatoirement choisi dans la parcelle, un sondage central et 4 sondages en croix autour de ce point. Dans ces sondages, le nombre de fois où l'alias a été rencontré (fréquence) a été compté, et sa profondeur mesurée. Pour avoir un maximum d'informations sur la répartition géographique de l'alias sur le Bouron, les coupes géologiques établies sur les forages BSS environnants¹⁰, ainsi qu'une carte dessinée par Casenave, 1970, qui délimite les différents types d'alias, évolués à peu évolués (Figure II-21) peuvent aussi être utilisées. Les alias les plus évolués se trouvent souvent là où la limite de battement de la nappe est la plus basse. D'après nos mesures, on pourrait faire l'hypothèse que l'alias est plus présent au Nord du bassin versant, mais la profondeur d'investigation pour ces mesures à la tarière manuelle n'est jamais supérieure à 1m. De même, il faut être prudent dans l'interprétation des données issues des forages BSS, car l'alias peut ne pas être décrit (comptes-rendus de forages parfois très succincts).

Pour le bassin versant du Tagon, un inventaire forestier réalisé en 2002 par l'INRA avait procédé à une recherche de l'alias. Le protocole était différent de celui utilisé lors de la campagne en 2008 sur le Bouron. Il consistait à faire un sondage, puis si l'alias était

¹⁰ Voir chapitre VI pour plus de détails

rencontré, la profondeur était relevée et les sondages stoppaient. Sinon, les mesures continuaient dans la limite de 4 sondages au maximum. D'après cette campagne, l'alios semble plus présent au sud-ouest du bassin versant par rapport au nord-est (Figure II-22). Ce protocole ne semble pas approprié, puisque sur le Bouron, les mesures ont révélé qu'il n'existe pas de relation entre profondeur de l'alios et sa fréquence, et que les données sont très variables pour un même site (Figure II-23). Il n'existe pas d'autre étude qui permette de comparer les résultats obtenus à partir de la campagne 2002 pour le bassin versant du Tagon.

2.4 Présentation des modèles utilisés

2.4.1 Modèle de croissance du Pin maritime GRAECO

Le modèle de fonctionnement primaire GRAECO (Loustau et al., 1992 ; Granier et Loustau, 1994 ; Porté, 1999 ; Loustau et al., 2001, 2005 ; Porté et Loustau, 2001 ; Davi et al. 2010 ; Ciais et al. 2010) permet de simuler les transferts dans le continuum sol-forêt-atmosphère pour la pinède atlantique du sud-ouest de la France. Ce modèle s'est développé en parallèle de l'expérimentation du Bray, en incluant un nombre de plus en plus important de processus, au fur et à mesure de l'intégration des résultats expérimentaux. Le site du Bray a servi de peuplement test pour la paramétrisation d'un grand nombre de processus dans le modèle, en particulier les mesures de flux turbulents (Berbigier et al., 2001).

Le modèle décrit (Figure II-24) : les transferts hydriques et les échanges d'eau et de vapeur dans le continuum sol-forêt atmosphère, l'absorption du rayonnement et l'immobilisation de carbone par les strates du couvert, la respiration autotrophe et hétérotrophe, la distribution du carbone entre les arbres, l'allocation du carbone entre les compartiments aériens et souterrains de l'arbre et finalement la croissance primaire et secondaire des arbres pris individuellement. Les pas de temps s'échelonnent entre la demi-heure et l'année selon les processus. Le modèle a été évalué pour l'évapotranspiration, l'absorption du rayonnement, le flux de CO₂, la croissance des arbres et l'allocation du carbone.

L'échelle spatiale considérée est celle du peuplement, c'est à dire typiquement une surface forestière d'un hectare, mais le modèle ne décrit pas les effets de voisinage entre les arbres. Les variables d'entrée utilisées sont des données météorologiques horaires (Température minimale et maximale, rayonnement global, pluviométrie, humidité relative minimale et maximale, vitesse du vent), ainsi que des informations standards sur le peuplement (âge, densité, biomasse).

Le couvert est décrit comme un ensemble de trois couches, la canopée des arbres, le sous-bois et le sol. L'évolution annuelle de la surface de chaque couche est calculée par le modèle à partir du gain en carbone des strates végétales et d'un modèle phénologique dépendant des sommes de température (Desprez-Loustau et Dupuis, 1994). Chaque strate est assimilée à une grosse feuille horizontale homogène, caractérisée par ses propriétés radiatives (coefficient d'atténuation du visible et du rayonnement net) et diffusives (conductance aérodynamique et stomatique). L'évapotranspiration est calculée pour ces trois couches, suivant l'approche Penmann-Monteith, en prenant en compte l'état d'humidité de chaque couche qui est donné par un modèle d'interception des précipitations.

Les transferts d'eau dans le sol sont calculés selon un bilan de masse. Trois zones sont distinguées dans le sol : une zone racinaire, une zone non saturée et une zone saturée. Les transferts entre la zone non saturée et la nappe sont décrits selon une loi de Darcy généralisée.

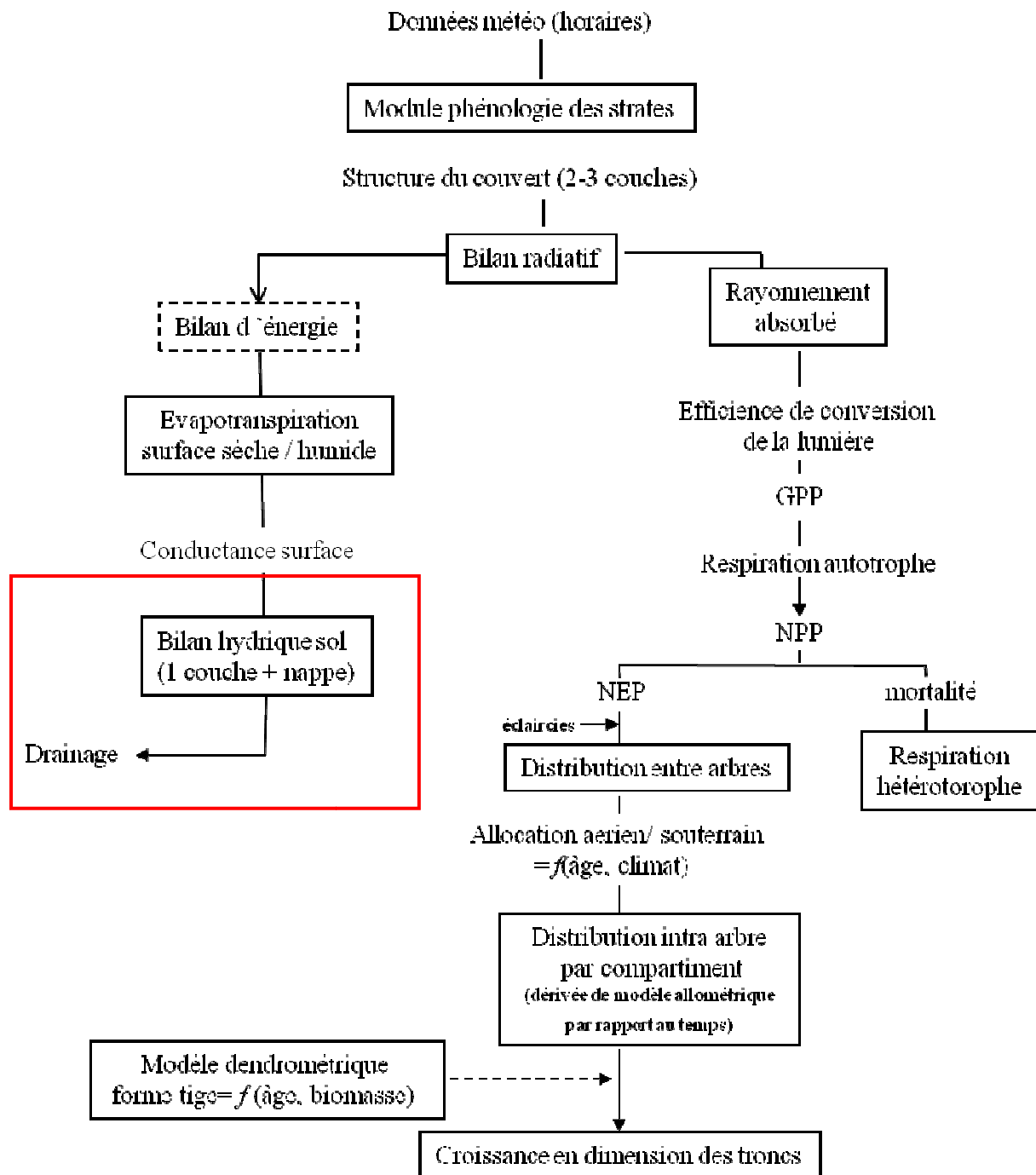


Figure II-24 : Organigramme simplifié du modèle GRAECO (Porté, 1999). Les sigles utilisés sont : GPP, Gross Primary Production, NPP, Net Primary Production, NEP : Net Ecosystem Production. La partie encadrée en rouge correspond à la zone de couplage entre les deux modèles.

Le drainage en profondeur de la nappe (vidange du système) est basé sur une relation empirique, fondée sur les observations au site du Bray. Les prélèvements par la végétation sont pris en compte dans la zone racinaire. La reprise par les prélèvements de la végétation se fait par assèchement de la couche la plus humide accessible aux racines, donc potentiellement dans la zone saturée en eau du sol lorsque celle-ci se trouve dans la zone racinaire. L'évaporation du sol nu se fait par assèchement de la couche en surface.

2.4.2 Modèle hydrogéologique NEWSAM

Le modèle NEWSAM (Ledoux, 1980 ; Ledoux et al., 1984 ; Levassor et Ledoux, 1999) est un modèle mécaniste traitant des écoulements hydrogéologiques souterrains, en utilisant les équations aux dérivées partielles des écoulements en milieu poreux (équation de diffusivité).

L'évolution de la charge hydraulique de la nappe aquifère est calculée pour un pas de temps de calcul : une "phase", durant laquelle les conditions aux limites et les termes-sources sont considérés constants. La durée de cette phase peut aller de l'heure à l'année. Elle permet de simuler les écoulements en régime permanent ou en régime transitoire dans le système aquifère. Les interactions entre nappe et mailles rivières sont uniquement basées sur la décharge de la nappe vers la rivière, ou de la rivière vers la nappe (Figure II-25), i.e, on considère que la nappe donne de l'eau à la rivière si la hauteur de la nappe est supérieure au niveau de la rivière et vice-versa. Si la nappe passe sous le niveau du fond de la rivière, la rivière donne de l'eau à la nappe avec un débit fixé (Q_0).

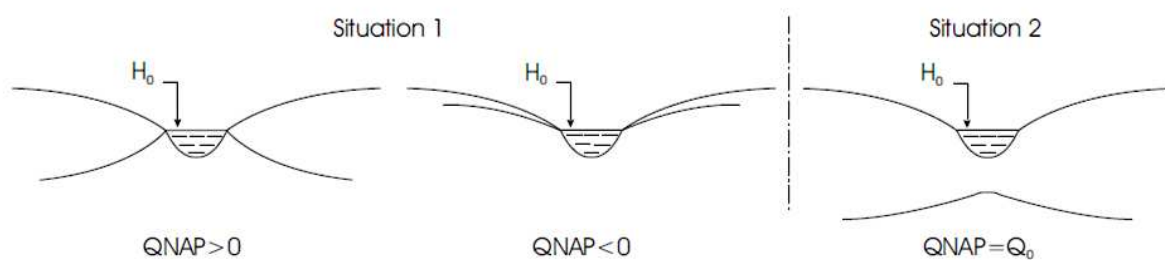


Figure II-25 : Relations nappe-rivière. Q_{NAP} est le débit qui arrive à la nappe, par convention dans NEWSAM, les injections dans le système aquifère sont négatives, les sorties sont positives.

NEWSAM est un modèle distribué, basé sur des mailles carrées, qui peuvent si nécessaire, être emboîtées, i.e, de résolution plus fine sur les zones sensibles. La mise en œuvre de la structure du modèle, i.e., la création de ce maillage, se fait à l'aide du logiciel GEOSAM.

Les données d'entrée du modèle sont : côte du mur, côte du toit de l'aquifère, côte initiale dans les drains, transmissivité (ou conductivité hydraulique selon le choix de l'utilisateur), coefficient de transfert vers les drains, débit d'alimentation, et en régime transitoire, coefficient d'emmagasinement.

2.5 Résumé

Après une recherche des sites favorables à l'échelle du Massif Landais, deux sites expérimentaux ont été sélectionnés : le bassin versant du Bouron, de surface égale à 35 km² pour un réseau hydrographique de 31 km, et le bassin versant du Tagon, de 22 km² pour un réseau de 21.7 km. Ils ont été choisis pour :

- (1) leur proximité géographique,
- (2) leur ressemblance du point de vue de leur occupation du sol et de sa dynamique,
- (3) l'historique des recherches ayant eu lieu sur site,
- (4) la présence de mesures hydrologiques antérieures à la présente étude
- (5) l'impact des deux tempêtes Martin (1999) et Klaus (2009), différent sur les deux sites.

L'équipement de ces sites a été réalisé ou complété par l'INRA en milieu d'année 2009 à l'aide d'enregistreurs automatiques pour le suivi de la piézométrie (7 sites au Bouron, 5 sites au Tagon) et le suivi des débits (Tagon), ainsi qu'un suivi météorologique léger.

Une série de campagnes de terrain a permis de collecter des informations sur :

- (1) le réseau de drainage : morphologie, type permanent ou temporaire, côte,
- (2) les limites du bassin versant, par détermination de la ligne de partage des eaux
- (3) les boisements et le type de sous-bois
- (4) la répartition de l'altimétrie sur les bassins versants.

Le chapitre suivant traite de l'évolution des couverts forestiers sur ces deux sites expérimentaux, cartographie réalisée à l'aide d'outils de télédétection et d'inventaires forestiers in situ.

Chapitre III

Etude rétrospective de la dynamique spatio-temporelle des peuplements de Pin maritime sur les deux sites expérimentaux pour la période 1984- 2007

*"Arriver quelque part est tellement moins important
qu'être en bonne compagnie durant le trajet"
(Colby, F.M. date inconnue)*

III. Table des matières

3.1	Introduction.....	79
3.2	Données satellitaires, cartographiques, de terrain et statistiques	82
3.2.1	Images SPOT	82
3.2.2	Données cartographiques	82
3.2.3	Placettes forestières in-situ.....	83
3.2.4	Données forestières statistiques de l'IFN.....	85
3.2.4.1	Statistiques contemporaines (Cycle 5).....	85
3.2.4.2	Statistiques cycles 2 (1978), 3 (1988) et 4 (1998)	85
3.2.5	Informations sur l'âge au moment de la coupe	86
3.3	Méthodologie	87
3.3.1	Cartographie des types de couverts en 2007.....	87
3.3.1.1	Segmentation et Classification de l'image multi-date SPOT 2007/2008.....	87
3.3.1.2	Corrections et opérations morphologiques	90
3.3.2	Amélioration de la précision de l'information sur l'âge à partir de la carte des coupes rases de l'IFN	91
3.3.3	Simulation des âges des couverts forestiers de Pin maritime de 1985 à 2007.....	93
3.3.3.1	Affinement de la délimitation des entités forestières	95
3.3.3.2	Simulation d'un âge en 2007 pour les parcelles de Pin maritime dont l'information sur l'âge est discrète.....	95
3.3.3.3	Simulation des âges de 1985 à 2007	96
3.3.4	Dynamique des métriques paysagères	97
3.3.5	Calcul du bilan de carbone	97
3.4	Résultats et discussion	101
3.4.1	Cartographie de l'occupation du sol en 2007.....	101
3.4.2	Cartographie des âges des couverts de Pin maritime améliorée avec la carte des coupes rases	102
3.4.3	Cartographie des âges à un an près en 2007	105
3.4.4	Evolution de la distribution des classes d'âge entre 1984 et 2007	105
3.4.1	Evolution de l'hétérogénéité du paysage forestier entre 1987 et 2007	106
3.4.1	Evolution du bilan de carbone entre 1987 et 2007 sur les deux sites	113
3.5	Conclusion	118

3.1 Introduction

La succession forestière naturelle ou la rotation sylvicole, son homologue en forêt gérée, sont des processus fondamentaux dont l'influence est majeure sur le fonctionnement des cycles de l'eau, des nutriments et du carbone (Song et al., 2007).

L'âge est un facteur qui conditionne à la fois les flux d'eau dans l'arbre (diminution de la transpiration liée à l'âge, Delzon et Loustau, 2005), mais aussi les flux d'eau sous la parcelle (diminution de la conductivité hydraulique au fur et à mesure que le sol s'organise depuis la coupe rase jusqu'à la forêt mature, Chossat et Campagne, 1997). Ces effets, cumulés à l'échelle de bassins versants, peuvent influencer la circulation de l'eau à l'échelle régionale (Bens et al., 2007). La disparition du couvert forestier, par l'exploitation d'une forêt mature, entraîne une perturbation des cycles des nutriments dans le sol, avec une perte rapide du carbone immobilisé du sol par lessivage (Arrouays et al., 1995). Dès l'exploitation et jusqu'à la plantation, les pertes azotées peuvent être très importantes (Trichet et al., 1999). L'intensification de la sylviculture, basée sur le raccourcissement des rotations, et donc un changement dans la structure d'âge vers des peuplements plus jeunes, expose l'écosystème à des exportations accrues et non-renouvelées, en particulier pour les nutriments très mobiles. Enfin, l'âge, avec la biomasse, est un paramètre clef dans l'estimation des bilans de carbone (Powell et al., 2010), car la variation du stock d'une année sur l'autre dépend du nombre de parcelles qui ont atteint l'âge d'exploitation, et qui sont effectivement récoltées, et/ou de la mortalité.

La structure d'âge et son évolution au cours du temps sont donc des variables clefs pour comprendre le fonctionnement d'une région forestière (Song et Woodcock, 2003).

Les méthodes conventionnelles d'inventaire forestier, sur des placettes terrain, permettent d'avoir une bonne connaissance de la structure d'âge des peuplements forestiers d'une région mais ne sont pas appropriées pour la modélisation, qui requiert une représentation continue de la variable âge dans l'espace et le temps.

La télédétection semble pouvoir répondre à cette demande, puisque depuis 1972, des satellites observent la terre à moyenne résolution (10 à 80 mètres) permettant l'étude de paramètres d'intérêt tels que l'âge, la densité, la hauteur des canopées, etc., à l'échelle du peuplement (Holmgren et Thuresson, 1998). La réponse spectrale d'un couvert forestier en fonction de l'âge est contrôlée par la structure du peuplement (densité, arrangement spatial des arbres, espèce ou mélange d'espèces concerné, etc.), la structure du couvert (taux de couvert et surface foliaire) et la réflectance du sol et/ou du sous-bois (Nilson et Peterson, 1994). Danson et Curran (1993) (cité dans Jolly, et al., 1996) ont montré que la structure des peuplements est la variable la plus déterminante dans le cas des résineux monospécifiques. Cependant, la contribution du sous-bois pouvant varier d'une parcelle à une autre, la signature spectrale entre des parcelles de même âge peut-être significativement différente (Guyon et al., 2001 ; Song et al., 2007) et complique le processus de classification d'image. La plupart des études dans la littérature traitant de la distinction de classes d'âges dans des régions forestières ont

échoué à obtenir plus de 3 groupes, généralement dénommés : jeunes, matures, et vieux peuplements, parfois sans limite d'âge précis. Au delà de ce seuil, la fiabilité de la classification diminue considérablement (Cohen et al., 1995 ; Sachs et al., 1998 ; Liu et al., 2008). L'utilisation combinée d'images satellitaires et d'approches par réseau de neurones ("Neural Network", Kimes et al., 1996 ; Jensen et al., 1999) ou d'informations texturales (Buddenbaum et al., 2005 ; Kayitakire et al., 2006) sont des méthodes qui peuvent cependant augmenter la fiabilité des classifications pour l'estimation de variables telles que l'âge. De même, un nombre grandissant d'études utilisant des méthodes orientées objet ont démontré l'intérêt de cette procédure de classification pour la cartographie de paramètres partagés par des pixels voisins (voir Baschke, 2010, pour une synthèse bibliographique complète). Cette méthode permet de prendre en compte l'information spectrale et contextuelle d'un pixel (valeur des pixels voisins) afin d'extraire des régions spatialement continues et homogènes à partir d'une image satellitaire (Desclée et al., 2006). Deux avantages majeurs en découlent : (1) par rapport à un traitement classique pixel à pixel, il n'y a plus d'effet de pixellisation dans les cartes obtenues (effet "salt and pepper", Desclée et al., 2006 ; Baschke, 2010), (2) les entités issues du traitement d'image sont directement utilisables dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG), puisque chaque objet créé correspond à une entité dont tous les pixels sont de même nature. Cette méthode, largement utilisée depuis ces dernières années pour la cartographie des couverts forestiers (Dorren et al., 2003 ; Hay et al., 2005 ; Chubey et al., 2006), a été peu utilisée dans les Landes (uniquement pour la cartographie des dégâts de tempête ; IFN, 2010 ; Chehata, 2011). Pourtant, une variable telle que l'âge des peuplements des forêts de Pin maritime dans les Landes de Gascogne semble répondre au caractère objet, puisque le massif forestier est découpé en parcelles de gestion monospécifiques et équiennes. Les divers essais de classification pixel-à-pixel, menés jusqu'à présent sur la région, n'ont pas pu établir de règles de classification permettant la discrimination de plus de deux classes de type de peuplements, avec un fort déséquilibre des âges : peuplements de moins de 5 ans (Wigner et al., 1997) ou coupes rases (Jolly et al., 1996) d'un côté, et tous les autres types, de l'autre.

Une revue bibliographique des études utilisant les données satellitaires pour la sylviculture, réalisée par Holmgren et Thuresson (1998), dénonce le fait que les développements récents de la discipline vers une complexité toujours plus grande n'aient apporté que peu d'améliorations par rapport aux résultats des précédentes études. Il est vrai que peu d'études se sont focalisées sur la valorisation des jeux de données existants pour la production d'informations utilisables par la filière forestière. La méthodologie mise au point par Jolly (1993) pour la cartographie annuelle des coupes rases dans la forêt de Pin maritime (*Pinus pinaster*) à partir d'images à haute résolution spatiale (30m, Landsat TM, depuis 1984), en est cependant un bon contre-exemple. En effet, sur ces bases et depuis 1999, l'IFN (Inventaire Forestier National) gère de façon opérationnelle la production de cartes de coupes rases qui, chaque année, permettent de connaître l'évolution de la ressource en Pin maritime sur l'ensemble de la région Aquitaine (Stach et al., 2005). Les cartes sont maintenant

disponibles depuis 1985, constituant une base de données précieuse pour estimer l'âge à un an près de chaque parcelle dont on connaît l'année d'exploitation du peuplement précédent (Jolly et al, 1993). La carte des coupes rases permet ainsi de retrouver une variable âge continue, indispensable pour l'initialisation des modèles comme le modèle de croissance du Pin Maritime GRAECO ("GRowth and Allocation based on ECOphysiological processes") développé au laboratoire EPHYSE dès 1999, permettant de calculer les bilans d'énergie, d'eau et de carbone (Porté, 1999, Loustau et al., 2005, Ciais et al., 2010).

Le premier but de ce travail est de proposer une méthode de cartographie de l'âge des peuplements de Pin maritime du Massif Landais et de quantifier les variations de la distribution des âges au cours des décennies passées, en s'appuyant sur des données de télédétection à haute résolution (20-30m, type SPOT-LandSat). La méthode proposée s'articule en deux phases. Premièrement, la cartographie des classes d'âge de l'époque contemporaine est obtenue à partir d'images SPOT acquises en 2007-2008, traitées selon une approche orientée objet. Deuxièmement, l'âge actuel à 2 ans près est estimé via l'utilisation des cartes des coupes rases produites de 1984 à 2006 par l'IFN, des statistiques fournies par l'IFN, et en se basant sur un certain nombre d'hypothèses, afin de reconstituer anti-chronologiquement l'âge des peuplements de 1982 à 2006.

Le second objectif de ce travail est l'utilisation de ces cartes pour la modélisation spatialisée du fonctionnement hydrique et carboné de petits bassins versants, en particulier pour comprendre l'importance de la modification de la structure des couverts de Pin maritime sur les flux d'eau et de carbone (Chapitre V). La méthodologie mise au point dans ce chapitre est donc appliquée aux sites du Bouron et du Tagon, présentés au chapitre II, afin de reconstituer la distribution âge de 1984-2007, de tester la reproductibilité de la méthode et de comparer les résultats obtenus sur les deux bassins versants

La période d'étude (1984-2007) inclut la tempête Martin de décembre 1999. Les sorties seront analysées pour trois années caractéristiques : 1987, 1997 (état avant tempête) et 2007 (état après tempête), pour comprendre la dynamique temporelle des bassins versants et mesurer l'impact de la tempête Martin de 1999 sur les peuplements, en termes d'évolution: (1) de la distribution des âges, de la quantité de biomasse, et donc de carbone, stockée dans la forêt de Pin maritime et (2) de la structure paysagère des différents types de peuplement.

3.2 Données satellitaires, cartographiques, de terrain et statistiques

Un grand nombre de données de type différent ont été nécessaires pour cette étude :

- une série d'images SPOT a été acquise entre août 2007 et février 2008, pour la caractérisation des différents types de couverts et l'obtention des grandes classes d'âge des peuplements de Pin maritime pour l'année 2007. Ces données ont été complétées par des mesures in-situ pour caractériser les peuplements sur les deux bassins versants, et par des informations cartographiques telles que la base de données Corine Land Cover et les plans cadastraux.

- pour affiner la connaissance de l'âge des peuplements à partir de l'année d'exploitation, les cartes des coupes rases de l'IFN issues de l'imagerie Landsat TM, ont été utilisées.

- l'information a ensuite été croisée avec les orthophotos de l'IGN de l'année 2004, pour retrouver des entités de gestion réalistes puis, à partir des distributions statistiques de l'IFN disponibles (taux de coupe par an, distribution de l'âge des peuplements en 2007 sur le massif landais, âge au moment de l'exploitation), l'âge des peuplements pour les années 1985 à 2007 est reconstitué.

Les données utilisées sont détaillées ci-après par type, et non pas dans l'ordre de leur utilisation, dans un souci de clarté.

3.2.1 Images SPOT

La cartographie de l'âge des peuplements en 2007 est fondée sur des images SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) multi-spectrales à 20m. L'utilisation d'une série d'images a été nécessaire pour tirer profit de la variabilité saisonnière de la réflectance des différents types de végétation sur les zones d'études. Les images du 3 et 4 août 2007, du 9 septembre 2007 et du 23 février 2008, ont été exploitées. Les images de septembre 2007 et février 2008 sont issues du satellite SPOT 2 (canaux vert, rouge et proche infrarouge). Les images d'août 2007, prises par SPOT 4, contiennent une bande spectrale supplémentaire dans le moyen infrarouge. Ces 4 images ont été regroupées pour obtenir une image multidate multi-canaux.

Les traitements ont été réalisés sur un extrait de dix mille hectares (11.9 km sur 8.4 km) pour le bassin versant du Bouron, et de quinze mille hectares (14.4 km sur 10.1 km) pour le Tagon.

La projection utilisée est le Lambert II étendu, le système géodésique associé est le NTF, basé sur l'ellipsoïde de Clarke II 1880.

3.2.2 Données cartographiques

Quatre jeux de données cartographiques ont été utilisés :

- les données issues de la carte des coupes rases, disponibles de 1985 à 2006¹¹. Ces cartes résultent d'un processus de détection des changements de réflectance imputables aux coupes rases intervenues entre deux années successives à partir d'images Landsat (5 TM et 7 ETM), suivi d'une étape de validation visuelle (se reporter à Jolly et al., 1996 ; Jolly, 1993 ; Deshayes et al., 2006 ; pour la méthodologie détaillée et des illustrations). L'aire de l'unité cartographique minimale sur ces cartes est de 1 hectare. Les cartes sont fournies à la résolution est de 15m, et la localisation d'une limite de coupe est connue à 45 m (Jolly, 1993).

- la base de données géographique Corine Land Cover CLC 2000, renseignant sur les grandes classes d'occupation du sol. L'unité cartographique minimale est de 25 hectares et la résolution de 25m (Nunes de Lima, 2005)

- les données cadastrales pour les deux bassins versants. Pour le Tagon, une version numérique datant de 2002 était disponible¹². Pour le Bouron, une partie seulement du cadastre était numérisée autour de la commune de Belin-Beliet¹³. La partie manquante a été vectorisée sous ArcGIS par nos soins à partir du cadastre papier de la commune d'Hostens (planches A1 à A6).

- Les dalles orthophotos de l'IGN pour l'année 2004, de résolution 50 cm en couleur. Les dalles kilométriques utilisées sont (coordonnées Lambert II) : X de 345 à 360, Y de 1945 à 1955 pour le bassin versant du Bouron, X de 330 à 345, Y de 1965 à 1975.

3.2.3 Placettes forestières in-situ

Pour connaître la réalité terrain des sites d'étude choisis, des données d'inventaire forestier in-situ ont été réunies. Pour les deux sites, une première phase de stratification par photo-interprétation des Orthophotos IGN a permis de définir des sous-échantillons de placettes de futaie de Pin maritime pure, représentatives de leur type : (1) peuplements jeunes en lignes visibles et au couvert non fermé, (2) peuplements d'âge moyen dont la canopée est complètement fermée, (3) peuplements âgés dont les cimes sont larges et bien visibles, pas toujours organisés en lignes, et dont la canopée est mitée. L'échantillonnage est ensuite aléatoire dans chacun des sous-échantillons, leur nombre dépend des moyens humains (homme-jour) disponibles et vise à échantillonner au moins 30 % de la surface totale du bassin versant (les parcelles de surface inférieure à 2 hectares sont exclues en raison de leur faible représentativité).

Pour le bassin versant du Tagon, 86 placettes ont été échantillonnées entre août et novembre 2002 par l'Unité Expérimentale Forestière de l'INRA de Bordeaux (Cormier, 2006).

¹¹ produites par l'INRA pour la période 1984-1990 (Jolly, 1993) et par l'IFN depuis 1990, financé par le Projet RESSOURCES (IFN, 2001), puis par le CIBA, Centre Interprofessionnel des Bois d'Aquitaine (IFN, 2008)

¹² réalisée par le CEMAFREF dans le cadre du projet ACI (Action Concertée incitative) Ecologie Quantitative du Ministère de la Recherche (2002)

¹³ mis à disposition gracieusement par le Parc Naturel Régional des Landes de Gascogne, dans le cadre de cette étude

Leur âge en 2007 a été calculé, pour les parcelles non passées en coupes rases, en ajoutant 4 ans à l'âge mesuré en fin d'année 2002.

Sur le bassin versant du Bouron, une première série de 40 points a été échantillonnée dans le courant de l'été 2008, points choisis aléatoirement et réalisés par l'Unité Expérimentale. Une seconde série de 30 points a été inventoriée en Octobre 2008 par nos soins pour compléter cet échantillonnage. Pour optimiser le temps passé sur le terrain, des groupes de 6 parcelles voisines représentatives de la variabilité des sous-échantillons ont été sélectionnés (l'échantillonnage n'est plus aléatoire dans l'espace). De la même manière, et parce que le site expérimental du Bouron présente un certain nombre de parcelles atypiques du point de vue de leur réponse spectrale, une série de 30 points non aléatoirement choisis a été échantillonnée en septembre 2008, dans des zones jugées représentatives de la variabilité des modes de gestion (groupes de 6 parcelles voisines). Enfin, trois placettes supplémentaires dont l'âge était connu (étude dendrologique, voir chapitre II) issues de la campagne d'inventaire réalisée à l'échelle du massif landais, courant de l'été 2008, et qui se trouvaient sur le bassin versant, ont été incluses dans ce jeu de données.

Au total, 103 parcelles ont été échantillonnées sur le bassin versant du Bouron entre juillet 2008 et octobre 2008.

Le Tableau III-1 résume les mesures réalisées sur les parcelles échantillonnées utilisées dans le cadre de cette étude, et leur disponibilité pour les deux bassins versants. Pour les détails sur le protocole de mesure, se reporter aux documents et références donnés dans la table.

Tableau III-1 : Mesures réalisées sur les placettes d'échantillonnage pour les deux bassins versants au cours des campagnes terrain (DBH=Diamètre de la tige à 1.30m).

	Campagne	Nombre de placettes	Surface placette d'inventaire	Données disponibles			Référence
				DBH (Nombre d'arbres)	Age (méthode de mesure)	Densité	
Tagon	Août à novembre 2002	86	Variable	Oui (10)	Oui (carottage à la base du tronc ou verticilles)	Oui	Cormier, 2006
Bouron	Unité expérimentale (été 2008)	40	Variable	Oui (10)	Oui (carottage à la base du tronc et verticilles)	Oui	Guillot et al., 2009a
	Dendrologie (été 2008)	20	625 m ²	Oui (tous)	Oui (carottage à la base du tronc)	Oui	Guillot et al., 2009b
	Septembre 2008	30	Variable	Oui (6)	Oui (verticilles)	Non	Sprannraft et al., 2010
	Octobre 2008	30	Variable	Oui (6)	Oui (verticilles)	Oui	

3.2.4 Données forestières statistiques de l'IFN

3.2.4.1 Statistiques contemporaines (Cycle 5)

L'IFN a fourni une distribution des surfaces de futaie régulière de Pin maritime pur, par classe d'âge, pour la période 2005-2008 à partir des données de l'inventaire du cycle 5 (voir Tableau III-2). Il s'agit de résultats issus de la nouvelle méthode d'inventaire, mise en place à partir de 2005 sur le Massif landais : un dixième des placettes est désormais inventoriés chaque année (cycle de 10 ans avec sondage spatial systématique annuel sur l'ensemble de la France). Etant donné que 3 années seulement sont disponibles (sur les 10 de la période 2005-2015), l'IFN n'a pas pu nous fournir la distribution à une échelle plus fine que celle du Massif Landais (ensemble des placettes du Plateau Landais, du Marensin, des Dunes littorales et du Bazadais). Les statistiques sont fournies par agrégation en classes d'âge de 10 ans et de 5 ans lorsqu'elles sont statistiquement significatives¹⁴. Cet inventaire, réalisé après la tempête Martin de 1999, inclut les effets de la tempête sur les peuplements.

Tableau III-2 : Surface des forêts de production du Massif Landais avec le Pin maritime comme essence principale selon la classe d'âge, campagnes d'inventaires de 2005 à 2008 de l'IFN. IC = intervalle de confiance.

CLASSE D'AGE	Superficie (ha)	Nombre de points	Superficie - IC (en %)
0-9 ans ou non recensable	147 994	151	15
10-14 ans	74 967	77	22
15-19 ans	80 333	88	21
20-24 ans	54 734	59	26
25-29 ans	61 928	66	24
30-34 ans	62 949	67	24
35-39 ans	46 318	54	28
40-49 ans	81 952	92	20
50-59 ans	74 362	85	21
60 ans et plus	66 051	78	23
TOTAL :	751 588		

3.2.4.2 Statistiques cycles 2 (1978), 3 (1988) et 4 (1998)

Les statistiques sont relatives aux futaies régulières de Pin maritime, les données sont les suivantes : (1) Surface des forêts de production (en ha), (2) Nombre total de tiges de Pin maritime, (3) Surface terrière (m²), (4) Volume de bois fort tige (en m³), ainsi que le nombre de placettes sur lequel repose l'estimation.

¹⁴ lorsque le coefficient de variation sur la surface forestière est inférieur à 30% et lorsque celui de la grandeur dendrométrique est inférieur à 100%.

Les données sont ventilées selon les critères suivants : (1) Département, (2) cycle d'inventaire, (3) Région forestière nationale, (4) région forestière départementale, (5) Classe d'âge.

3.2.5 Informations sur l'âge au moment de la coupe

Les distributions de l'âge d'exploitation ont été puisées dans différents rapports afin de prendre en compte leur évolution au cours du temps (Figure III-1). Le tirage aléatoire a été réalisé selon la distribution pour la période 1987-1990, disponible, dans la thèse A. Jolly (1993, p.35), ou, pour la période 1990-1999, selon la distribution issue du rapport du projet RESSOURCES (IFN, 2001, p.A-29), ou bien encore pour la période 2000-2006, selon la distribution trouvée dans le rapport IFN (2008, p.12). Avant 1990, la distribution est issue de la comparaison des inventaires des cycles 2 et 3 sur le Massif landais. Après 1990, elle résulte d'une analyse croisée des données IFN des cycles 3 et 4 et des données de la carte des coupes rases issue de la télédétection.

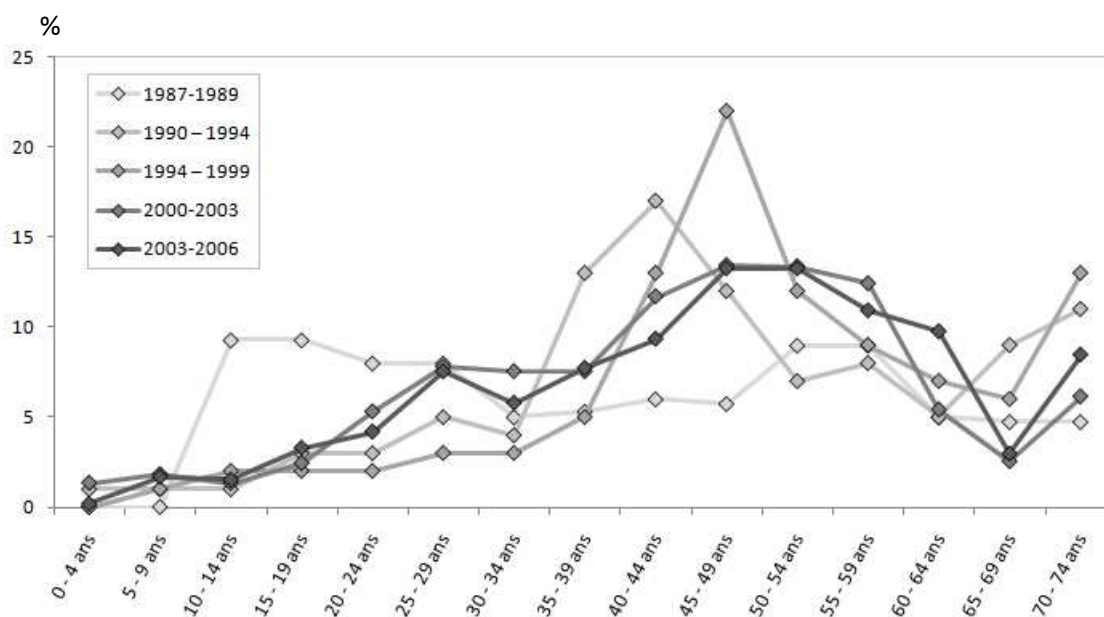


Figure III-1 : Distribution de l'âge des peuplements de pin maritime au moment de l'exploitation en coupe rase, et évolution entre 1987 et 2006 (Jolly, 1993, IFN, 2001 et 2008).

3.3 Méthodologie

Dans cette partie méthodologique, la chaîne de traitement qui a abouti à la caractérisation des peuplements sur les deux bassins versants est expliquée de façon synthétique (Voir l'organigramme complet en Figure III-2). Un compte-rendu détaillé (étape par étape) est disponible sous la forme d'un rapport technique rédigé par Spannraft, K. à l'issue de son travail de stage (Spannraft, 2009).

3.3.1 Cartographie des types de couverts en 2007

3.3.1.1 *Segmentation et Classification de l'image multi-date SPOT 2007/2008*

Dans les landes de Gascogne, il est possible d'utiliser une méthode orientée objet en raison de l'organisation spatiale caractéristique du paysage, composé de parcelles de Pin maritime équiens de forme quasi-rectangulaires, et entrecoupé de villes, feuillus, coupes rases ou terres agricoles à la dynamique spectrale annuelle différente. Les données SPOT pour les deux sites ont donc été traitées selon cette méthode à l'aide du logiciel Spring, V.4.3.3 (Camara et al., 1996).

Lors d'une première phase, les pixels voisins qui ont des propriétés spectrales similaires sont agrégés en segments, selon les critères définis par l'utilisateur : aire minimale du segment (AMS) et facteur de similarité (FS). Les contours des segments obtenus suivent exactement les contours des pixels qui ont été regroupés (pas d'arc-smoothing). La seconde phase du traitement consiste à affecter ces segments d'image à une classe. La classification de Bhattacharya, fondée sur le maximum de la distance du même nom qui évalue la probabilité de la séparation complète entre classes, a été utilisée à cette fin.

Quatre paires de segmentation/classification ont été réalisées :

(1) pour les couverts forestiers feuillus et les zones agricoles. La dynamique spectrale forte, caractéristique des parcelles agricoles et des feuillus au cours de l'année, liée à leur phénologie, justifie le fait que ces deux types aient été traités ensemble.

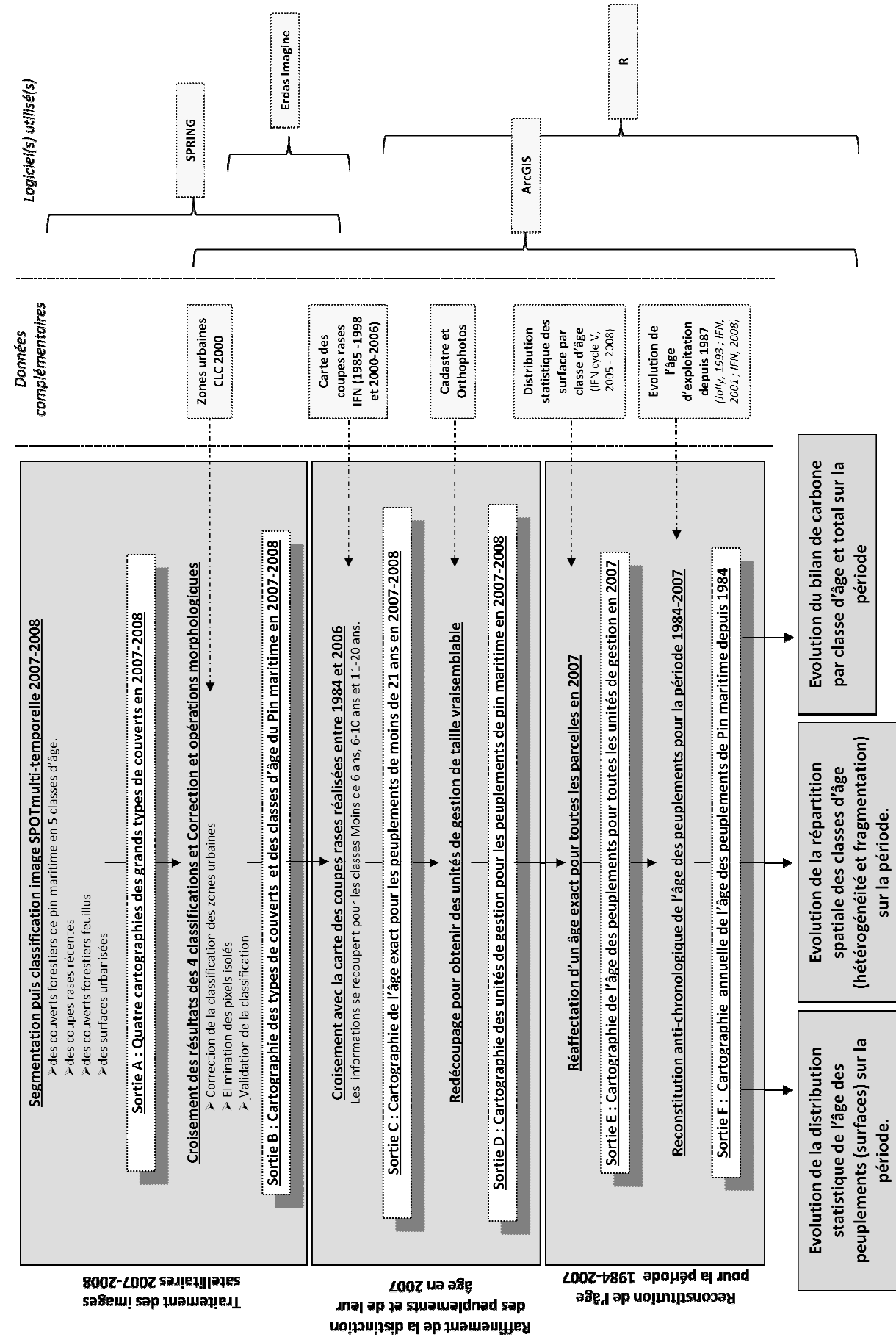
(2) pour les coupes rases. Les parcelles de coupes rases revégétalisées par le sous-bois et les parcelles de pins fraîchement reboisées ne peuvent pas facilement être distinguées, du fait de la prépondérance des strates herbacées et arbustives ; le résultat de la classification des coupes rases contient donc aussi les parcelles fraîchement replantées.

(3) pour les zones urbaines,

(4) pour les couverts forestiers de Pin maritime, en classe d'âge.

Pour chacun de ces types de traitement, le choix des dates et des bandes spectrales pour la segmentation ainsi que pour la classification, et le choix des valeurs de paramètres de segmentation (AMS et FS), résultent d'un apprentissage sur des placettes de référence (voir Tableau III-3).

Figure III-2 : Organigramme général du traitement réalisé pour l'obtention des cartes de la structure des âges pour les parcelles de pin maritime de 1984 à 2007



Les placettes d'apprentissage sont pour les bassins versants :

- du Bouron : les parcelles échantillonnées au cours des campagnes d'Octobre et Septembre 2008, et les trois parcelles de la campagne dendrologique de l'été 2008,
- du Tagon : 40 parcelles pour lesquelles l'âge a été mesuré précisément à partir de carottes prélevées à la base du tronc.

Pour la segmentation des couverts forestiers de Pin maritime, la MMU utilisée pour les deux bassins versants est supérieure à celle utilisée pour tous les autres traitements. Des tests préliminaires ont montré qu'au delà du seuil de 30 pixels la précision de la classification diminue largement. Cela n'a pas paru critique, dans la mesure où, compte tenu de la résolution de l'image, ce seuil correspond à une aire de 1.2 ha. Il est possible de rencontrer des parcelles de taille inférieure sur les zones d'étude, mais elles sont relativement rares du fait de l'orientation sylvicole intensive des parcelles de forêt.

Tableau III-3 : Bandes spectrales et paramètres utilisés pour la segmentation et la classification des différents types de couverts sur les bassins versants du Bouron et du Tagon.

		Segmentation			Classification
		Bandes spectrales utilisées	AMS	FS	Bandes spectrales utilisées
Bouron	Feuillus et agriculture	PIR et MIR Août 2007	10	10	Tous
	Coupes rases	MIR Août 2007 Vert, Rouge, PIR de février 2008	10	10	B2, B3 et B4 Août 2007 B2 et B3 Septembre 2007 B2 et B3 février 2008
	Villes	MIR Août 2007 Vert, Rouge, PIR de février 2008	10	10	B3 et B4 Août 2007 B1, B2, B3 février 2008
	Pin maritime	Rouge, PIR et MIR Août 2007	30	2	Rouge, PIR et MIR Août 2007 Rouge et PIR Février 2008
Tagon	Feuillus et agriculture	PIR Août 2007 PIR février 2008	10	10	Tous
	Coupes rases	MIR Août 2007 Vert, Rouge, PIR de février 2008	10	10	B2, B3 et B4 Août 2007 B2 et B3 Septembre 2007 B2 et B3 février 2008
	Villes	MIR Août 2007 Vert, Rouge, PIR de février 2008	10	10	B1, B2, B3 Septembre 2007
	Pin maritime	Rouge, PIR et MIR Août 2007	30	7	Rouge, PIR et MIR Août 2007

La différence de FS entre le Bouron et le Tagon pour la segmentation des couverts de Pin maritime a été imposée par les différences structurelles entre les deux sites. Pour les deux bassins versants, la signature spectrale des parcelles d'apprentissage d'une même classe peut être très hétérogène selon la gestion pratiquée par les propriétaires. C'est particulièrement critique dans le cas du bassin versant du Tagon. En effet, ce site présente une forte hétérogénéité de l'amont (parcelles détenues par des fonds d'investissements qui pratiquent

une gestion intensive classique) vers l'aval (proche du bassin d'Arcachon, parcelles morcelées, relativement âgées et à valeur patrimoniale).

Les 4 classifications sur les 4 types de couverts sont ensuite regroupées en une seule et unique couche vectorielle sous ArcGIS. L'outil "Model Builder" disponible sous ERDAS Imagine V.8.7 a été utilisé pour attribuer un segment à une classe unique.

La performance du traitement est estimée via l'analyse de la matrice de confusion (table de contingence à double entrée), en comparant le résultat du classement des pixels à leur classe réelle sur des parcelles de validation. Deux critères sont particulièrement intéressants pour juger des résultats de la classification (Congalton, 1991):

- l'erreur de commission renseigne sur la proportion de pixels qui n'auraient pas dû être classés dans chaque classe considérée et qui sont affectés dans cette classe.

- l'erreur d'omission porte sur les pixels qui auraient dû être classés dans chaque classe considérée et qui n'y sont pas. Elle permet de juger de la performance des parcelles d'entraînement données en entrée (classificateur).

Pour la classification des surfaces en Pin maritime, toutes les parcelles qui ont été choisies aléatoirement à cet effet et qui n'ont pas été employées pour l'apprentissage ont été utilisées (soit 40 parcelles pour chaque bassin versant). La classification pour tous les autres types de couverts a été validée via l'analyse d'orthophotos disponibles sur la zone d'étude.

3.3.1.2 Corrections et opérations morphologiques

La dynamique spectrale annuelle des surfaces urbanisées et des coupes rases peu ou pas végétalisées (sol nu) étant sensiblement identique, des précautions particulières ont été prises pour la classification des villes. Une première correction manuelle ("Raster Editor" de Spring) a été nécessaire afin de corriger les confusions entre ces deux types de couverts à partir des observations sur les orthophotos. Enfin, afin d'éviter les confusions entre espaces verts urbains et coupes rases, la base de données CLC 2000 (Nunes de Lima, 2005) qui distingue ces deux types de couverts a été croisée (après homogénéisation de la résolution) avec les résultats de la classification. Les jardins urbains ont été attribués à la classe d'occupation du sol "ville".

A l'issue des traitements précédents, il subsiste des pixels isolés ou de petits segments qui n'ont pas de valeur de classe. Afin de les inclure dans les classes issues du résultat de la superposition, une opération morphologique est réalisée sous Erdas Imagine (V.8.7). Toutes les surfaces inférieures ou égales à 400m² sont ainsi reclassées par regroupement dans le segment le plus proche.

A l'issue de ce travail, 12 classes d'occupation du sol différentes sont renseignées sur la carte. Six classes ont été obtenues concernant la forêt de Pin maritime, qui sont fonction de

critères d'âge : (1) Peuplements de plus de 40 ans, (2) Peuplements de 21 à 40 ans, (3) Peuplements de 11 à 20 ans, (4) Peuplements de 6 à 10 ans, (5) Coupes rases réalisées avant 2007/2008 et jeunes peuplements de moins de 6 ans, enfin (6) Coupes rases réalisées en 2007/2008. Pour finir, 6 classes supplémentaires concernent les autres types de couverts : (1) Feuillus, (2) Surface agricole (*Zea maïs*), (3) Surfaces agricoles (autres), (4) Prairies, (5) Zones urbaines, et (6) Eau.

3.3.2 Amélioration de la précision de l'information sur l'âge à partir de la carte des coupes rases de l'IFN

La carte des coupes rases permet de connaître l'année de coupe des parcelles de Pin maritime exploitées entre 1985 à 2006. L'âge en 2007 de ces peuplements doit donc forcément être inférieur à la durée de temps écoulée depuis la coupe. Cette information peut donc être utilisée pour connaître l'âge, à un ou deux ans près, en 2007, de toutes les parcelles exploitées en coupe rase depuis 1985, moyennant une hypothèse sur le temps de repos entre coupe rase et reboisement. Elle a aussi permis d'améliorer la précision de la carte de l'âge en 2007 en corrigeant les éventuelles erreurs d'affectation de classe.

Une première phase de préparation des données issues de la carte des coupes rases est nécessaire. Il faut tout d'abord homogénéiser la résolution spatiale de la carte des coupes rases de l'IFN avec les autres informations géographiques (la résolution de toutes les couches passe à 10m). Les deux périodes disponibles (1985-1998, Jolly, 1993 et 2000-2006, IFN, 2008) sont réunies dans une géodatabase afin d'en vérifier la topologie. Un traitement sous Erdas Imagine corrige les incohérences morphologiques. Les surfaces inférieures à 1 hectare sont retirées de la base avant le croisement.

La carte des coupes rases permet de retrouver l'âge à un an près des peuplements de Pins qui ont moins de 21 ans en 2007, c'est-à-dire ceux qui appartiennent aux classes "coupes rases et jeunes peuplements de moins de 6 ans", "peuplements de 6 à 10 ans" et "peuplements de 11 à 20 ans". Le Tableau III-4 donne l'âge attribué en 2007 en fonction de la fenêtre temporelle utilisée pour la détection des coupes. Elle repose sur l'hypothèse qu'une parcelle est mise deux années en repos végétatif avant d'être replantée, en raison des risques d'attaque des plants par l'Hylobe, *Hylobius abietis* L. (Trichet et al., 1999).

A noter, deux exceptions à cette hypothèse :

- pour les polygones ayant des coupes réalisées entre 1997 et 1999 (code IFN 98), en raison de l'importance des travaux de nettoyage pour exploiter les chablis suite aux dégâts de la tempête Martin de 1999, les plantations prévues pour l'année 2000 ont plutôt été reportées à 2001, d'où l'attribution d'un âge de 6 ans en 2007,
- pour les polygones des coupes réalisées entre 1999 et 2000 (code IFN 20) incluant les coupes d'exploitation "normales" post-tempête et certainement quelques parcelles restant à

Tableau III-4 : Age attribué en 2007 en fonction de la période de détection de la coupe indiquée dans la cartographie IFN des coupes rases (détection des coupes par comparaison d'images Landsat à un ou deux ans d'intervalle, se reporter à Jolly, 1993)

Code IFN	Période de détection	Année de reboisement	Age en 2007	Classe carte 2007
85	1984-1985	1987	20	peuplements de 11 à 20 ans
86	1985-1986	1988	19	
87	1986-1987	1989	18	
88	1987-1988	1990	17	
89	1988-1989	1991	16	
90	1989-1990	1992	15	
91	1990-1991	1993	14	
92	1991-1992	1994	13	
93	1992-1993	1995	12	
94	1993-1994	1996	11	
95	1994-1995	1997	10	peuplements de 6 à 10 ans
96	1995-1996	1998	9	
97	1996-1997	1999	8	
98	1997-1999	2001	6	
20	1999-2001	2003	4	coupes rases et jeunes peuplements d'âge inférieur ou égal à 5 ans
22	2001-2002	2004	3	
23	2002-2003	2005	2	
24	2003-2004	2006	1	
25	2004-2005	2007	0	
26	2005-2006	2008	0	

nettoyer après la tempête Martin de 1999, la même hypothèse s'applique. Le reboisement est décalé à l'année 2003, et on attribue un âge de 4 ans en 2007.

Ces traitements ont été réalisés à l'aide de l'outil d'Algèbre Spatial disponible sous ArcGIS. La concordance entre la géométrie des polygones issus de la cartographie des types de couverts en 2007 et celle des polygones de la carte des coupes rases est relativement bonne. Il arrive cependant que l'intersection de ces deux couches géographiques entraîne la création de pixels isolés ou de petits polygones de bordure, facilement identifiables selon un critère de taille (<1 ha). Un traitement morphologique sous Erdas Imagine permet de les agréger aux polygones voisins de plus grande taille.

Dans quelques cas, des polygones de la carte des coupes rases recoupent des polygones de la classe "peuplement de 20 à 40 ans". L'âge est forcé par la carte des coupes rases, qui est considérée comme plus fiable, dans le cas où la surface est supérieure à 1 hectare.

La nouvelle cartographie des couverts végétaux en 2007 contient donc :

- (1) une information sur tous les types de couverts autres que la forêt de Pin maritime
- (2) une information sur l'âge des parcelles de Pin maritime :
 - soit continue, avec le calcul d'un âge pour les peuplements de 1 à 20 ans issus du recoupement avec la carte des coupes rases,
 - soit discrète, i.e. en classe d'âge :
 - pour les peuplements d'âge supérieur à 21 ans (classes "peuplement de 20 à 40 ans" et "peuplement de plus de 40 ans"),
 - pour certains des peuplements de moins de 21 ans non recouverts par la carte des coupes rases (omissions ou coupes réalisées après 2006).

3.3.3 Simulation des âges des couverts forestiers de Pin maritime de 1985 à 2007

Les modèles de croissance végétale, comme le modèle utilisé pour l'étude du fonctionnement du Pin maritime au laboratoire EPHYSE (Porté, 1999, Loustau et al., 2005, Ciais et al., 2010), ne peuvent pas être initialisés à partir de classes d'âge. L'âge des peuplements pour lesquels la valeur exacte n'est pas connue, i.e., ceux qui sont dans une classe d'âge, doit être affiné. Pour cela, l'information statistique sur la distribution des surfaces de futaie de Pin maritime par classe d'âge fournies par l'IFN peut être utilisée pour redistribuer les peuplements en proportion de la surface qu'ils occupent effectivement à l'échelle du Massif Landais. Une fois que l'âge de tous les peuplements en 2007 est connu, issu de la carte des coupes rases ou de la simulation à partir des distributions statistiques, il est possible de reconstituer la carte des âges anti-chronologiquement (de 2007 à 1984). Comme l'âge du peuplement avant son exploitation en coupe rase (âge l'année $n-1$) n'est pas connu, il faut le simuler à partir des distributions statistiques de l'âge d'exploitation au cours du temps fournies par l'IFN.

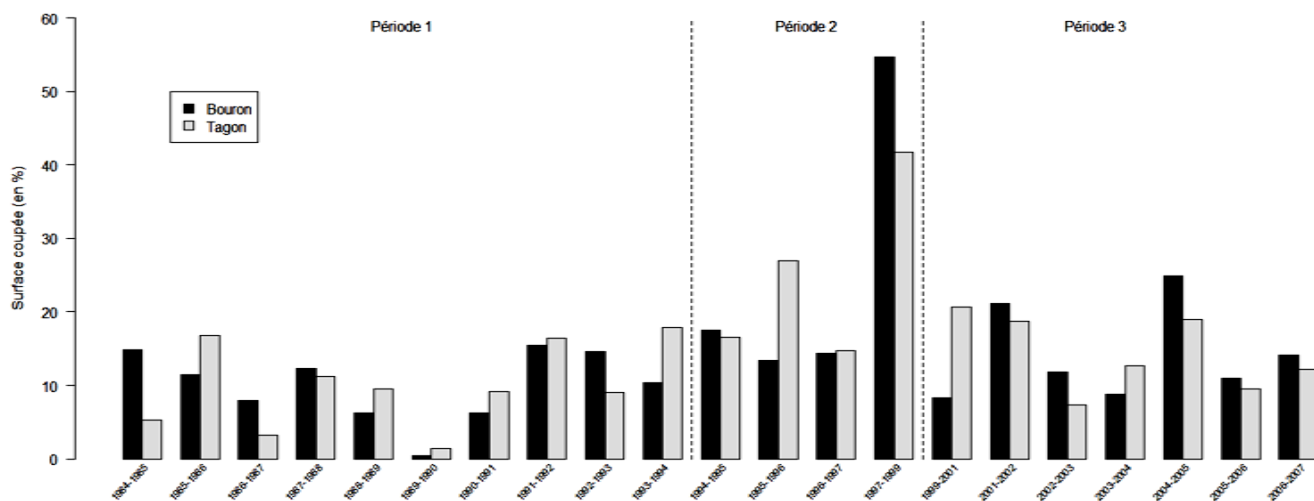


Figure III-3 : Taux de coupe par an (exploitation en coupe rase) pour les deux bassins versants : la période 15 correspond aux peuplements de la classe d'âge "11-20 ans", la période 25, à la classe d'âge "6-10 ans" et la période 35 à la classe d'âge "moins de 6 ans".

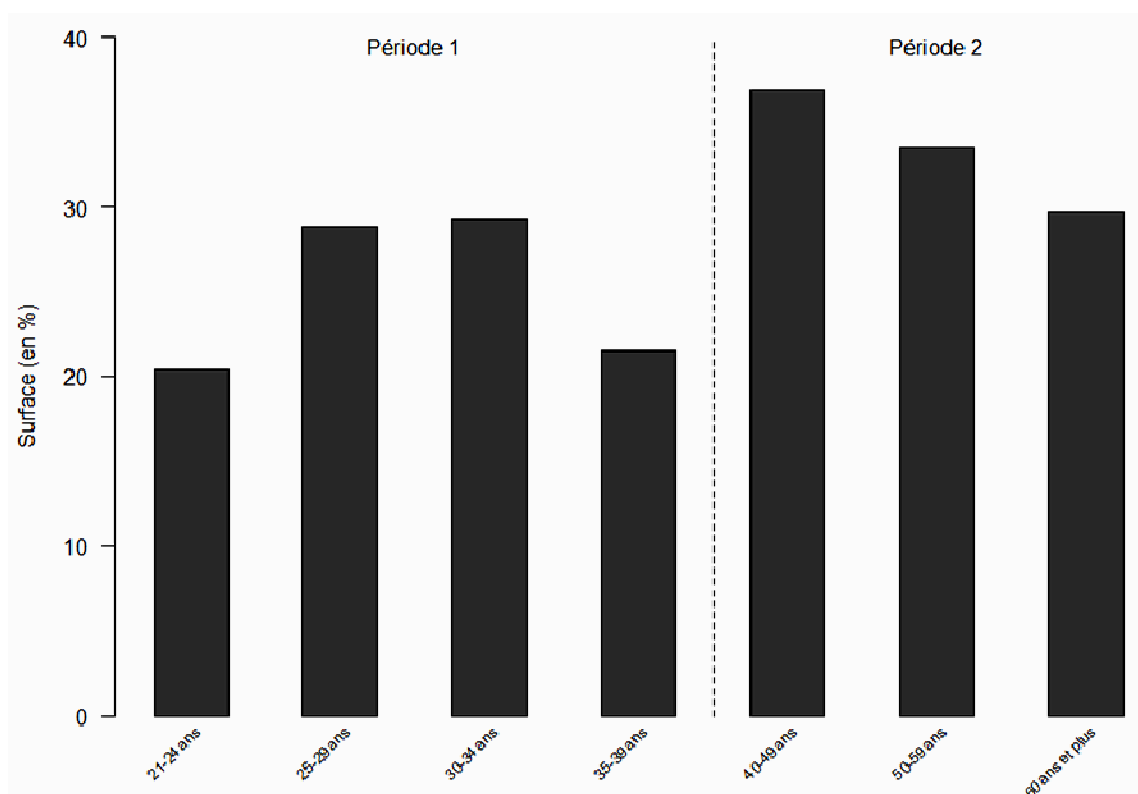


Figure III-4 : Répartition des classes d'âge des peuplements de futaie de Pin maritime pur sur le Massif Landais pour le Cycle 5 (2005-2008, données IFN) : la période 1 correspond aux peuplements de la classe d'âge "21-40 ans" et la période 25, à la classe d'âge "plus de 40 ans".

L'ensemble des traitements suivants a été réalisé sous R (R Development Core Team, 2010).

3.3.3.1 *Affinement de la délimitation des entités forestières*

Sur les deux bassins versants, de grandes surfaces appartenant à un même polygone, et donc une même classe d'âge, sont peu compatibles à la taille des unités de gestions sylvicoles, où tous les arbres ont exactement le même âge. A l'aide du cadastre et des Orthophotos disponibles sur la zone, ces grandes surfaces sont redécoupées le long des pistes forestières et des pare-feu, selon des critères visuels. Ce traitement (étape 5 du diagramme en Figure III-2) n'a pas été automatisé de façon à éviter la multiplication incontrôlée des petits polygones qui résultent systématiquement des intersections de couches géographiques, et qui nécessitent des corrections *a posteriori*.

3.3.3.2 *Simulation d'un âge en 2007 pour les parcelles de Pin maritime dont l'information sur l'âge est discrète*

Deux types de peuplement sont dans ce cas, comme indiqué en fin de paragraphe 4.3.2 : (1) les peuplements d'âge supérieur à 21 ans, et (2) les peuplements de moins de 21 ans non recouverts par la carte des coupes rases.

Les omissions de la carte des coupes rases sont faibles mais existent. Il faut réattribuer une année de coupe à 10.65 % et 10.69% des peuplements de 6 à 20 ans qui n'ont pas été recoupés par la carte des coupes rases, pour le Bouron et le Tagon respectivement. Les peuplements d'âge inférieur ou égal à 5 ans constituent un cas particulier, puisque la carte des coupes rases n'était pas disponible pour l'année 2007. Le taux d'omission dans cette classe est donc fort : 45.5 % et 48.7% respectivement pour le Bouron et pour le Tagon, mais la plus grande part de ces surfaces non attribuées correspond aux coupes les plus récentes ayant été réalisées entre la dernière carte des coupes rases disponible (2006) et la première image SPOT utilisée pour cette étude (2007).

A partir des cartes des coupes rases, on peut obtenir la distribution au cours du temps des surfaces coupées entre 1985 et 2007 sur les deux bassins versants (voir Figure III-3). Jusqu'en 1997, le taux de coupe est à peu près constant sur les deux bassins versants, et se situe aux alentours de 3.6 %. Cette dynamique change après 1999, avec un maximum lors de la période 1997-1999 (15.5% pour le Bouron, 13% pour le Tagon), qui correspond au nettoyage des parcelles endommagées suite à la tempête Martin.

L'effet est durable sur le Tagon, puisque le taux de coupe reste élevé pendant encore deux années (autour de 8%). Pour l'année 2007, le taux de coupe a été estimé égal au taux moyen des coupes réalisées entre 2003 et 2006. Cette distribution est utilisée pour affecter aléatoirement sous R une année d'exploitation aux omissions de la carte des coupes rases de

l'IFN, avec une exception pour la période 1999-2007. En effet, les polygones qui représentent une surface de plusieurs hectares (qui ne peuvent pas correspondre à une omission de la carte des coupes rases) sont prioritairement affectés à l'année de coupe "2007".

Il reste à attribuer un âge aux peuplements de plus de 21 ans. En partant de l'hypothèse que la distribution des âges en 2007 dans les bassins versants est identique à celle issue de la campagne d'inventaire du cycle 5 de l'IFN (2005 à 2008) pour le Massif Landais¹⁵ (paragraphe 4.2.4), l'affectation d'un âge à chaque parcelle résulte d'un tirage aléatoire dans cette distribution (Figure III-4) :

- "20-24 ans", "25-29 ans", "30-34 ans" et "35-39 ans" pour les "peuplements de 21 à 40 ans",
- "40-49 ans", "50-59 ans" et "60 ans et plus" pour les "peuplements de plus de 40 ans",

en supposant que la distribution des âges est uniforme dans chaque sous-classe d'âge. La localisation géographique d'une parcelle n'intervient pas dans le tirage (la distribution spatiale de l'âge est considérée comme étant aléatoire).

3.3.3.3 Simulation des âges de 1985 à 2007

La carte des coupes rases apporte une information pour l'année de la date d'exploitation mais n'indique pas l'âge du peuplement qui vient d'être coupé. Pour remonter dans le temps, il faut simuler l'âge avant la coupe des parcelles qui ont été exploitées entre 1985 et 2006. Les différentes distributions statistiques de l'âge au moment de la coupe (paragraphe 4.2.6) sont utilisées pour réaffecter un âge, selon la période concernée (Figure III-1).

L'information temporelle est maintenant complète pour chaque polygone : l'âge en 2007 est connu, ainsi que l'historique de la parcelle s'il y a lieu (une date d'exploitation et un âge avant coupe). L'âge de l'année n-1 peut donc être calculé en soustrayant un an à l'âge de l'année n, en partant de la carte de 2007, et en remontant jusqu'en 1984.

Deux cas particuliers sont traités séparément : les défrichements et les parcelles coupées deux fois depuis 1984.

Une parcelle qui est identifiée comme zone agricole lors de la classification en 2007/2008 peut ne pas toujours avoir eu une vocation agricole. Dans quelques cas, la carte des coupes rases se superpose à des zones agricoles : c'est un défrichement, c'est-à-dire un passage d'une utilisation forestière à une utilisation agricole. Ce phénomène concerne 27.1 ha sur le bassin versant du Tagon. Il est presque anecdotique sur le bassin versant du Bouron (3.7 ha).

Il peut arriver que sur une même parcelle, deux coupes rases aient été pratiquées en 22 ans (i.e. depuis 1985). Cette durée de rotation, trop courte par rapport à une révolution

¹⁵ le nombre de point d'inventaire IFN sur chaque bassin versant est trop faible pour produire une estimation de la distribution des âges pour ces sous-zones forestières

forestière classique (40 à 50 ans) est caractéristique par exemple d'une parcelle qui a été trop sévèrement endommagée par des ravageurs pour être maintenue, ou dont la plantation a échoué. L'exploitant fait alors le choix d'une coupe précoce. Ces parcelles représentent 30.1 ha sur le bassin versant du Bouron, 40.9 ha sur le bassin versant du Tagon.

3.3.4 Dynamique des métriques paysagères

La dynamique paysagère relative à la variabilité spatiale de l'âge des peuplements est étudiée à travers les paramètres classiques de l'étude du paysage : (1) Aire totale du paysage, (2) Aire de chaque type ou classe, (3) Nombre de parcelles, (4) Aire moyenne des parcelles, (5) Aire de la plus grande parcelle (Burel et Baudry, 1999). Le nombre et l'aire moyenne des parcelles sont des mesures directes de la fragmentation du paysage (Jomaa et al., 2008) : un nombre élevé de parcelles ayant une faible surface correspond à un paysage hautement fragmenté. Ces variables seront calculées pour des groupements paysagers, c'est-à-dire après fusion sous ArcGIS des parcelles appartenant à une même classe de largeur de 5 ans, sous la condition que les polygones soient adjacents, afin de mesurer la variabilité spatiale et temporelle de la répartition des âges au sein du paysage.

L'hétérogénéité du paysage, c'est-à-dire la diversité des éléments du paysage (les âges) et la complexité de leurs relations spatiales, est étudiée via le calcul de l'indice de Simpson (1949) :

$$SI = 1 - \sum_{i=1}^m (P_i^2) \quad (Eq. 3.1)$$

avec P_i la proportion occupée par le type d'unité paysagère (classe) i , et m la richesse du milieu, c'est-à-dire, le nombre de types, i.e. de classes dans notre cas.

L'indice de Simpson est moins sensible aux types rares que l'indice de Shannon (1949) classiquement utilisé en écologie du paysage pour la mesure de l'hétérogénéité (Burel et Baudry, 1999). Il représente la probabilité que 2 parcelles choisies aléatoirement dans le paysage soient de type différent. Il est égal à zéro lorsque la diversité du paysage est faible, et il est égal à un, au maximum, quand la distribution des aires de chaque type est équitable.

3.3.5 Calcul du bilan de carbone

L'estimation du stock de carbone se base sur le stock de biomasse, calculé selon les relations allométriques établies par Shaiek et al. (2011) pour le Pin maritime, de type :

$$Biomasse (kg) = a * DBH(m)^b \quad (Eq. 3.2)$$

avec $a = 5013$ et $b = 2.48$ pour la biomasse totale aérienne.

La biomasse a été calculée par Bélouard T., IFN, à partir des données des arbres pour toutes les placettes recensables (DBH supérieur à 23.5 cm), à partir des données "arbre" de l'inventaire forestier IFN des cycles 2, 3 et 4 (1978, 1988 et 1998 respectivement), puis agrégée pour le département de la Gironde en fonction de l'âge et pour chaque cycle d'inventaire. Toute estimation qui se base sur moins de 30 placettes n'est pas fiable (Bélouard, T., IFN, communication personnelle), et il faut alors s'appuyer sur des regroupements par département, par classe d'âge, etc. Ce critère de fiabilité aurait pu être respecté avec des classes d'âge plus fines, mais la largeur des classes d'âge retenue, pour des raisons de lisibilité, est de 10 ans. En effet, cette durée correspond à la durée de temps entre deux inventaires IFN successifs selon l'ancienne méthode (IFN, 2009).

Il n'a pas été possible de faire ce calcul pour le cycle 5 de l'inventaire (données "arbre" non disponibles). Les données seront donc estimées à partir du jeu de placettes d'échantillonnage acquises par l'INRA entre 2002 et 2008 sur l'ensemble du Massif Landais, à partir des mêmes équations allométriques. Toutes les données d'inventaire in-situ, mesurées par l'INRA entre 2002 et 2008, toutes campagnes confondues¹⁶, ont été utilisées pour se constituer une base de données biomasse contemporaine (176 parcelles). Le diamètre moyen par âge augmente entre les mesures réalisées lors des inventaires IFN du cycle 3 (1988) et du cycle 4 (1998) pour un âge donné (Figure III-5A). Le même phénomène est aussi visible entre le cycle 4 et nos données contemporaines. Les placettes d'inventaire contemporaines semblent correctement retranscrire l'évolution des peuplements qui était attendue, suite aux efforts continus d'amélioration variétale et des techniques sur le massif forestier landais (IFN, 2010). En raison du faible nombre de parcelles disponibles au delà de 50 ans et de la variabilité importante des DBH, la biomasse pour les peuplements de plus de 49 ans sera estimée pour un seul et unique groupe "50 ans et plus". Ces données de DBH ont servi à calculer la biomasse aérienne (Figure III-5B) des placettes contemporaines et à réaliser un ajustement reliant les variables Biomasse et âge, afin d'obtenir une valeur de biomasse pour le centre de classe, de 5 à 50 ans (voir dans le Tableau III-5 pour la significativité de l'ajustement).

Pour retrouver la biomasse totale, la biomasse racinaire est classiquement estimée en considérant qu'elle représente 20 % de la biomasse aérienne (Bert et Danjon, 2006). Elle est ensuite rapportée à l'échelle du peuplement (kg.ha^{-1}) en prenant en compte la densité du peuplement ($\text{nombre de tiges.ha}^{-1}$) mesurée lors de l'inventaire terrain pour la placette.

La quantité de carbone stockée est ensuite estimée en considérant que 50% de la biomasse totale (aérienne et racinaire) est constituée de carbone, indépendamment de l'âge et selon les recommandations du GIEC¹⁷ (Meredieu et al., 2005).

¹⁶ sauf la campagne de Septembre 2008 pour laquelle la densité n'a pas été estimée.

¹⁷ Groupe d'experts International sur l'Evolution du Climat

Tableau III-5 : Coefficient de la régression linéaire Biomasse aérienne (tonne/hectare)= log(Age) calculée à partir des données contemporaines, codes de significativité : ‘*’ $p < 0.001$ ‘**’ $p < 0.01$. Domaine de validité : peuplements de 3.5 ans à 72 ans, sur lesquels ont été réalisés l'ajustement.**

Coefficients modèle log (calculs sous R)					
Biomasse (tonne/hectare)= $a \cdot \log(\text{Age}) + b$					
	Estimation	Erreur standard	t value	Pr(> t)	
b=	-54.91	16.397	-3.349	0.0012	**
a=	42.404	4.863	8.72	1.68E-13	***

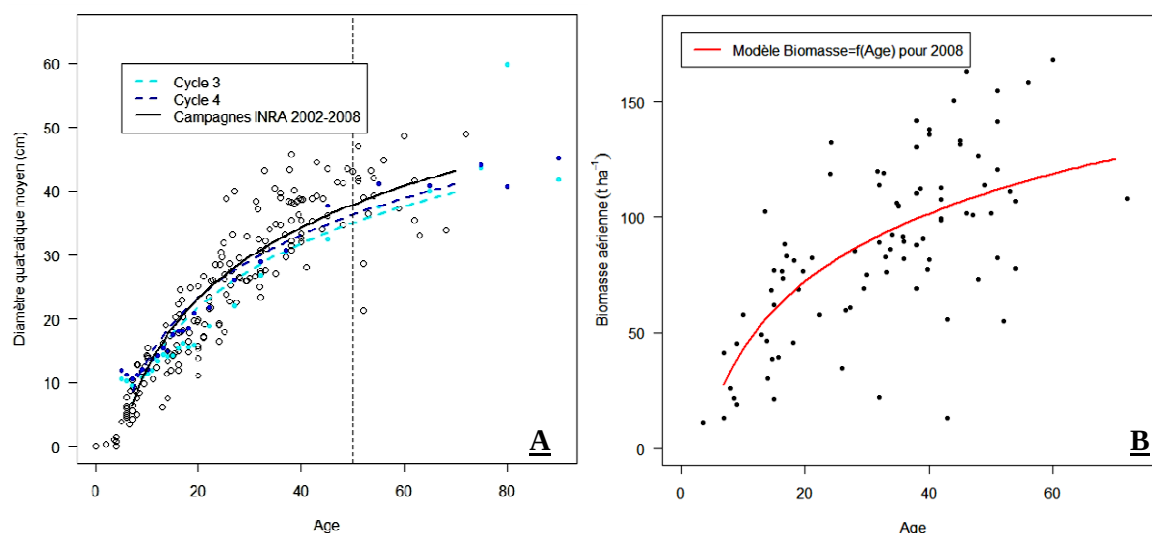


Figure III-5 : A) Diamètre quadratique moyen (cm) en fonction de l'âge, pour les cycles 3 (1988) et 4 (1998) de l'IFN et les données contemporaines issus des inventaires INRA réalisés entre 2002 et 2008, B) Biomasse aérienne (t.ha-1) en fonction de l'âge et modèle établi à partir de ce dernier jeu de données.

Tableau III-6 : Matrices de confusion avant et après l'amélioration par la carte des coupes rases pour les bassins versant du Bouron et du Tagon.

	Bouron			
	Avant amélioration		Après amélioration	
	Erreur d'omission (%)	Erreur de commission (%)	Erreur d'omission (%)	Erreur de commission (%)
Coupes rases et jeunes peuplements	20.00	20.00	20.00	20.00
6-10 ans	50.00	0.00	50.00	0.00
10-20 ans	60.00	0.00	10.00	18.18
20-40 ans	18.75	35.00	25.00	14.29
Supérieur à 40 ans	16.67	44.44	16.67	37.50
Précision globale (%)	69.23		79.48	

	Tagon			
	Avant amélioration		Après amélioration	
	Erreur d'omission (%)	Erreur de commission (%)	Erreur d'omission (%)	Erreur de commission (%)
Coupes rases et jeunes peuplements	0.00	50.00	0.00	60.00
6-10 ans	NA	NA	NA	NA
10-20 ans	50.00	66.67	75.00	0.00
20-40 ans	100.00	0.00	0.00	33.33
Supérieur à 40 ans	50.00	16.67	50.00	16.67
Précision globale (%)	45.00		60.00	

3.4 Résultats et discussion

3.4.1 Cartographie de l'occupation du sol en 2007

Les cartes issues de la classification orientée objet sont données en Figure III.6 A pour le Bouron, et Figure III.7 A pour le Tagon.

Le bassin versant du Bouron est composé à 91.3 % de surfaces forestières conifères ou feuillues, dont 86.4 % de pin maritime. Les surfaces agricoles représentent 2% (dont 67.8% dédiées à la maïsiculture), et les autres surfaces, dont les villes, représentent presque 6 % de la surface totale. Le bassin versant du Tagon est composé à 82.8 % de surfaces forestières, dont 74.8% de pin maritime. La part des surfaces agricoles est de 2% de la surface totale, et très peu sont utilisées pour la maïsiculture (environ 9%). Les villes et autres surfaces représentent une part plus importante que sur le Bouron, témoignant de l'urbanisation du massif à proximité du Bassin d'Arcachon, et occupent 14.8 % de la surface totale. Pour comparaison, l'analyse de la base d'occupation du sol CLC 2000 (Chapitre II) donne pour le Bouron : 92 % de surfaces couvertes forestières (dont pins 87%), 6% de surfaces agricoles et 2% de surfaces urbaines, et pour le Tagon : 89 % de surfaces de forêts (dont pins 86%), 2% pour l'agriculture, et 9% pour les surfaces urbaines. Compte tenu de l'évolution de l'urbanisation sur les bassins versants depuis 2000, nos résultats concordent parfaitement avec les estimations issues de la base de données CLC 2000.

L'approche orientée objet fonctionne bien sur des surfaces qui se distinguent nettement de leur entourage comme les surfaces hors forêt : le taux d'erreur (pourcentage de pixels mal classés) est très faible. Il est nul sur les deux bassins versants pour la classification des feuillus et des surfaces agricoles, et compte tenu des corrections apportées (paragraphe 4.3.1.1), la précision de la classification pour les surfaces urbaines est égale à 100%. La matrice de confusion, issue des résultats de la classification pour les couverts de Pin maritime, est consignée dans la table 4.6. Pour les parcelles de jeunes peuplements, l'analyse d'image ayant permis la pré-stratification pour le tirage aléatoire de parcelles de référence a été trop sévère dans la séparation des coupes rases et des jeunes peuplements. De plus, sur le Tagon, l'échantillonnage datant de 2002 n'a pas permis d'avoir un nombre suffisant de parcelles pour l'apprentissage et la validation. Par conséquent, il n'a pas été possible de calculer les erreurs de classification pour la classe 6-10 ans. Tous les indicateurs montrent un faible succès de la classification pour le Tagon : les taux d'omission et de commission sont grands pour toutes les classes d'âges supérieures à 10 ans. Ils sont corrects pour le Tagon, même si l'erreur d'omission de la classe 10-20 ans est améliorable.

Les résultats ne sont pas satisfaisants, malgré l'utilisation de la méthode de classification orientée objet. Comme d'autres auteurs l'ont fait remarquer auparavant, la

définition de critères automatiques pour l'attribution d'une classe d'âge aux peuplements de Pin maritime est difficile (Jolly, 1993, Wigneron et al., 1997). En effet, l'information thématique est faible pour la futaie de pin maritime (Guyon, 1987). Il est impensable de multiplier les parcelles d'apprentissage pour prendre en compte tous les cas possibles (mode de gestion, contribution de la dynamique phénologique du sous-bois, lui-même variable selon le type de lande, Guyon et al. 2001). Par ailleurs, pour une résolution spatiale de 20m, la texture de l'image renseigne peu sur la structure du peuplement de pin (Guyon et Riou, 1996). L'ajout de cette information n'aurait donc pas permis d'améliorer sensiblement la classification. Pour toutes ces raisons, exploiter l'information apportée par la carte des coupes rases de l'IFN s'avère indispensable.

3.4.2 Cartographie des âges des couverts de Pin maritime améliorée avec la carte des coupes rases

Les cartes des âges des couverts de Pin maritime après amélioration par la carte des coupes rases sont visibles sur la Figure III.6 B pour le Bouron, et la Figure III.7 B pour le Tagon.

La précision (Tableau III-6) de la classification pour le Bouron et le Tagon augmente et passe respectivement à 79.5 % et 60 %. Pour le Bouron, les erreurs de commission et d'omission sont équivalentes ou diminuent, en particulier pour la classe d'âge 20-40 ans qui est moins souvent confondue avec la classe d'âge 10-20 ans : la carte des coupes rases apporte une information plus fine sur l'âge des peuplements de 0 à 20 ans et supprime les erreurs de classification dans les classes de plus de 20 ans. Pour le Tagon, après amélioration, certains pixels de la classe d'âge 10-20 ans sont plus souvent omis (limites de validité de la carte des coupes rases) mais l'erreur de commission devient nulle. De même, après amélioration, aucun pixel de la classe 20-40 ans n'a été omis, et l'erreur de commission reste dans la gamme de celles classiquement trouvées pour la classification des peuplements de Pin maritime en classes d'âge (Jolly et al., 1996). La cartographie de cette classe d'âge est globalement meilleure.

Les itinéraires classiques pour la sylviculture du Pin maritime, tels que ceux rédigés par le Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF), recommandent au moins 2 ans de repos végétatif avant la réinstallation d'une plantation. Cependant, on peut considérer une marge d'erreur d'un à trois ans sur cette règle. L'erreur commise sur l'estimation de l'âge des peuplements à partir de la carte des coupes rases est donc en moyenne de 2 ans. Une seule étude à notre connaissance a essayé de retrouver l'âge des peuplements forestiers, i.e. comme une variable continue, dans l'Oregon, à partir d'une image Landsat TM et via une approche par réseau de neurones artificiels (Kimes et al., 1996). Les auteurs trouvent une erreur quadratique moyenne de 5 ans, ce qui est excellent, mais cette étude ne porte que sur une seule année (1991). Avec la valorisation des cartes des coupes rases réalisées depuis 1985,

Figure III-6: Cartographie des couverts en 2007 sur le bassin versant du Bouron :
(A) classification objet-orienté des images SPOT 2007-2008,
(B) après croisement avec la carte des coupes rases.

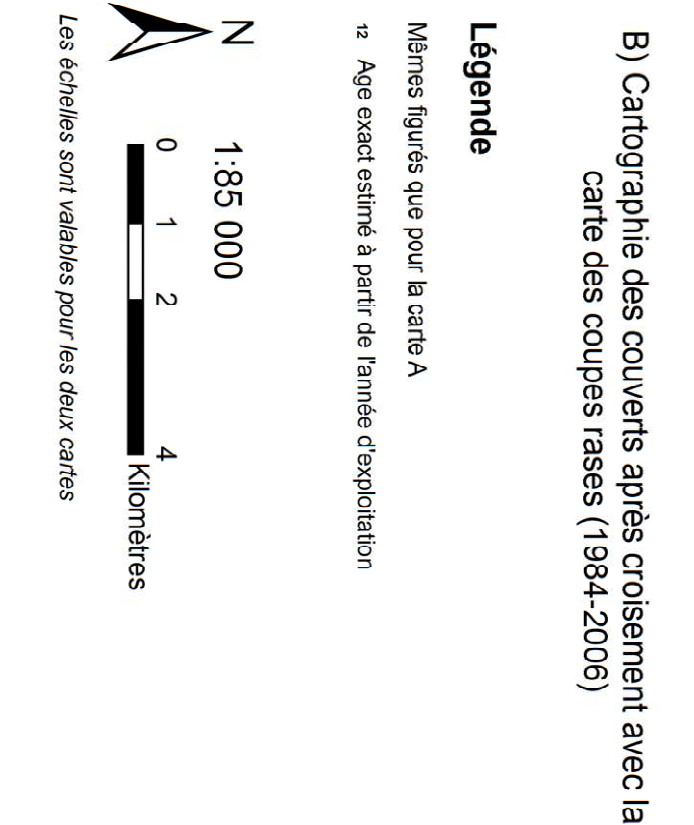
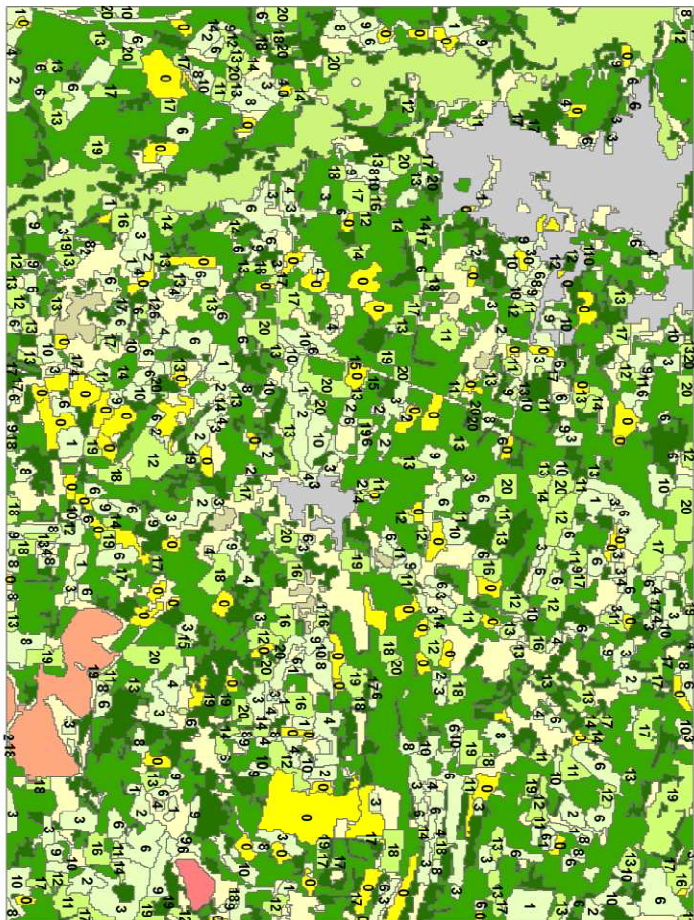
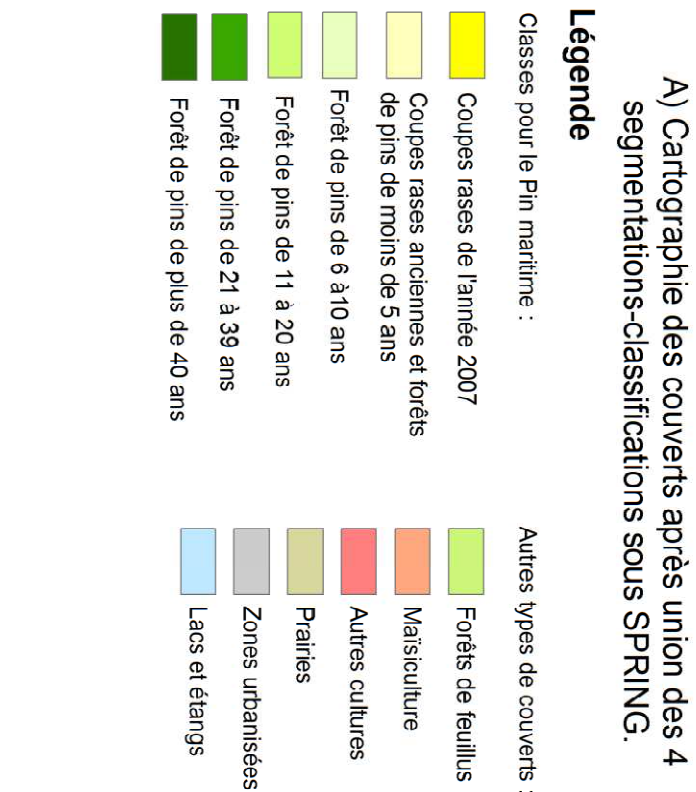
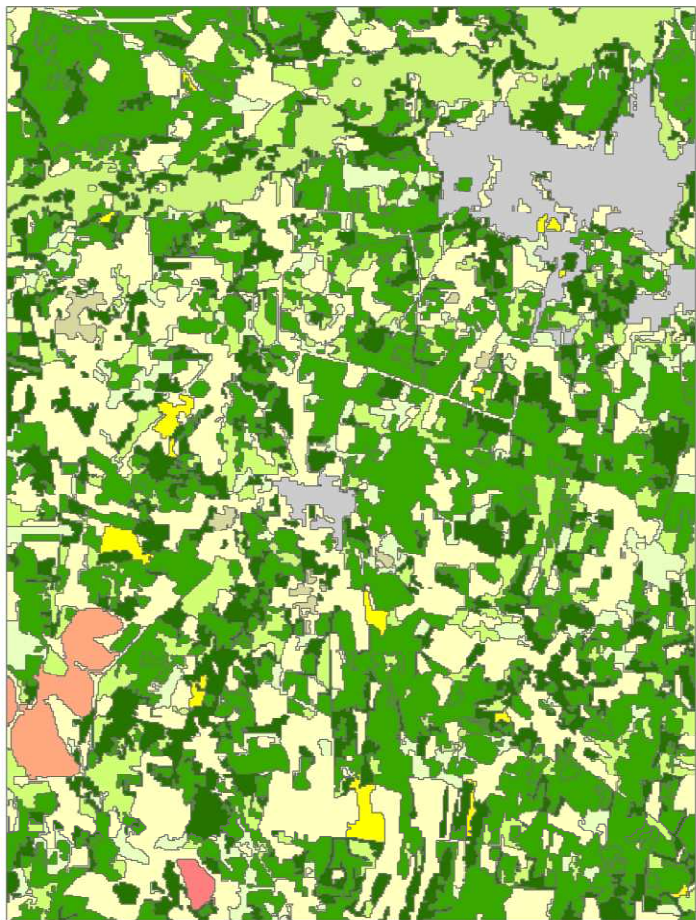
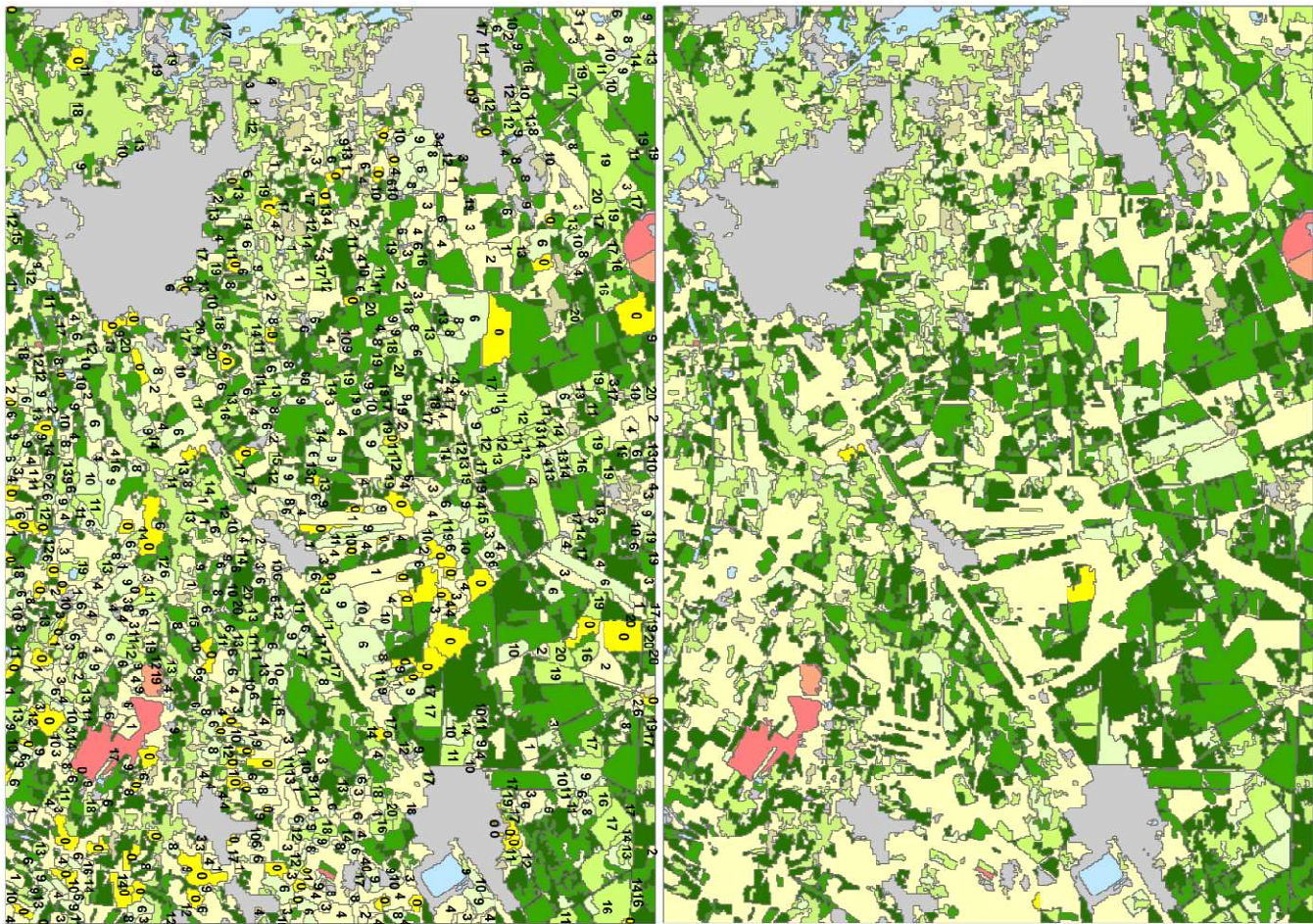


Figure III-7 : Cartographie des couverts en 2007 sur le bassin versant du Tagon.
 (A) classification objet-orienté des images SPOT 2007-2008,
 (B) après croisement avec la carte des coupes rases.



A) Cartographie des couverts après union des 4 segmentations-classifications sous SPRING.

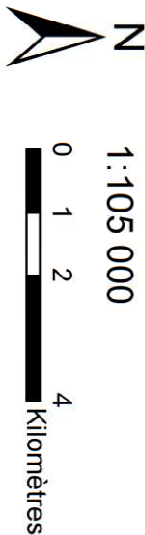
Légende

Classes pour le Pin maritime :	Autres types de couverts :
Coupes rases de l'année 2007	Forêts de feuillus
Coupes rases anciennes et forêts de pins de moins de 5 ans	Maïsiculture
Forêt de pins de 6 à 10 ans	Autres cultures
Forêt de pins de 11 à 20 ans	Prairies
Forêt de pins de 21 à 39 ans	Zones urbanisées
Forêt de pins de plus de 40 ans	Lacs et étangs

B) Cartographie des couverts après croisement avec la carte des coupes rases (1984-2006)

Légende

Mêmes figurés que pour la carte A
 12 Age exact estimé à partir de l'année d'exploitation



Les échelles sont valables pour les deux cartes

33.8 % et 34.1 % des parcelles ont maintenant un âge exact, plus ou moins 2 ans, sur les bassins versants du Bouron et du Tagon respectivement. Ce résultat est conforme aux estimations fournies par Jolly et al. (1993) qui avaient évalué à 30% la proportion des surfaces dont la classe d'âge serait connue au bout de 20 ans de réalisation de la carte des coupes rases. Cette version améliorée de la carte de l'occupation du sol sur les deux bassins versants est jugée satisfaisante et sert de base à tous les traitements subséquents.

3.4.3 Cartographie des âges à un an près en 2007

Les résultats de la cartographie des âges pour l'année 2007 sont visibles dans la Figure III-8 pour le Bouron, et Figure III-9 pour le Tagon.

La date de coupe a été simulée pour respectivement 20.3% et 18.6% des surfaces de la classe 6-10 ans pour le Bouron et le Tagon. Il s'agit des polygones qui n'ont pas été recoupés par la carte des coupes rases entre 1994 à 1997. Cette proportion est très faible dans la classe 11 à 20 ans, pour laquelle seuls 0.6 % des surfaces coupées entre 1984 à 1993 pour le Bouron et 0.3 % pour le Tagon ont été omises par la carte des coupes rases. Le processus de classification des images SPOT explique en partie cette différence : les erreurs de classification sont plus probables pour les couverts non fermés. Les matrices de confusion (Tableau III-6) étayent cette hypothèse pour les deux bassins versants.

Le taux d'omission estimé pour la carte des coupes rases est de l'ordre de 10 % sur l'ensemble du Massif (Thierry Bélouard, IFN, communication personnelle). Il est donc difficile de savoir si le désaccord entre la cartographie de 2007/2008 et les données de la carte des coupes rases est issu d'une mauvaise classification de certains couverts ou d'omissions provenant de la carte des coupes rases.

La simulation des âges pour les classes "21-40 ans" et "plus de 40 ans" a concerné respectivement 32.8% et 13.8% de la surface forestière totale sur le bassin versant du Bouron, 18.1% et 16.9 % sur le Tagon.

3.4.4 Evolution de la distribution des classes d'âge entre 1984 et 2007

Pour des raisons de lisibilité, les cartes n'ont pas pu être toutes figurées ici, mais le même type de carte que celui obtenu pour l'année 2007 et visible sur les Figure III-8 et Figure III-9 pour les bassins versants du Bouron et du Tagon respectivement, est disponible pour chaque année depuis 1984.

Les résultats de l'évolution de la distribution des âges sur les bassins versants au cours du temps est visible Figure III-10. En 1987, la structure des âges est dominée par deux classes sur les deux bassins versants : "10-15 ans" et "40-45 ans". La proportion de jeunes peuplements en 1987 est très importante pour le Bouron, peuplements qui se retrouveront en

2007 parmi les peuplements âgés (forte proportion de la classe "30-35 ans"). Sur Tagon, la situation est inverse : en 1987, la distribution des âges présente un fort déséquilibre des classes avec 1/3 des peuplements très âgés.

En 1997, 60 % des peuplements ont un âge supérieur à 20 ans pour les deux bassins versants. La part des coupes rases sur le bassin versant du Tagon augmente, probablement une conséquence de l'importante surface représentée par les peuplements proches de l'âge d'exploitation en 1987.

Après la tempête de 1999, la situation est complètement inversée entre les deux bassins versants par rapport à l'état de 1987. En 2007, il y a autant de peuplements ayant plus de 20 ans et moins de 20 ans sur le Bouron. En revanche, sur le Tagon, presque 64% des peuplements ont moins de 20 ans et 47 % ont un âge inférieur à 11 ans. Le Tagon, situé au Nord de la Gironde, a été plus fortement affecté par la tempête Martin de décembre 1999 que le Bouron, situé à la limite des départements de la Gironde (sud) et des Landes (nord). La modification de la structure des âges est visible 8 ans après la tempête avec un rajeunissement marqué sur le bassin versant du Tagon. Le même phénomène est aussi visible sur le Bouron, avec une surface de peuplement de moins de 10 ans d'âge supérieure aux années 1987 et 1997. Cependant, sur le Bouron, les peuplements de 30-35 ans constituent encore le couvert dominant en surface sur le bassin versant, tandis que sur le Tagon, c'est la classe d'âge 0-5 ans qui est la plus importante en surface. En effet, les peuplements âgés sont plus sujets aux dégâts de tempête (Cucchi, 2005), la structure d'âge est donc visiblement rajeunie sur les deux sites, en particulier pour le Tagon, géographiquement proche de l'épicentre de la tempête Martin de 1999.

En 2007, l'effort de simulation représentait (classes "moins de 6 ans", "6-10 ans", et "10-20 ans" non couvertes par la carte des coupes rases, et classes "21-40 ans" et "plus de 40 ans" incluses) respectivement 60.9 % et 54.39 % de la surface forestière totale sur les bassins versants du Bouron et du Tagon. Plus on remonte le temps, plus l'effort de simulation est important, et davantage de parcelles ont un âge simulé. La totalité des parcelles ont un âge simulé en 1984 : si elles n'ont pas été exploitées depuis 1984, elles ont logiquement plus de 22 ans, et appartiennent à la classe "21-40 ans" ou "plus de 40 ans". Les barres d'erreurs figurées sur les histogrammes en Figure III-10 correspondent à l'écart type calculé sur les résultats de 20 tirages différents (par bassin versant). Plus on remonte dans le temps, plus cet écart est important, cependant, il ne dépasse jamais 1%.

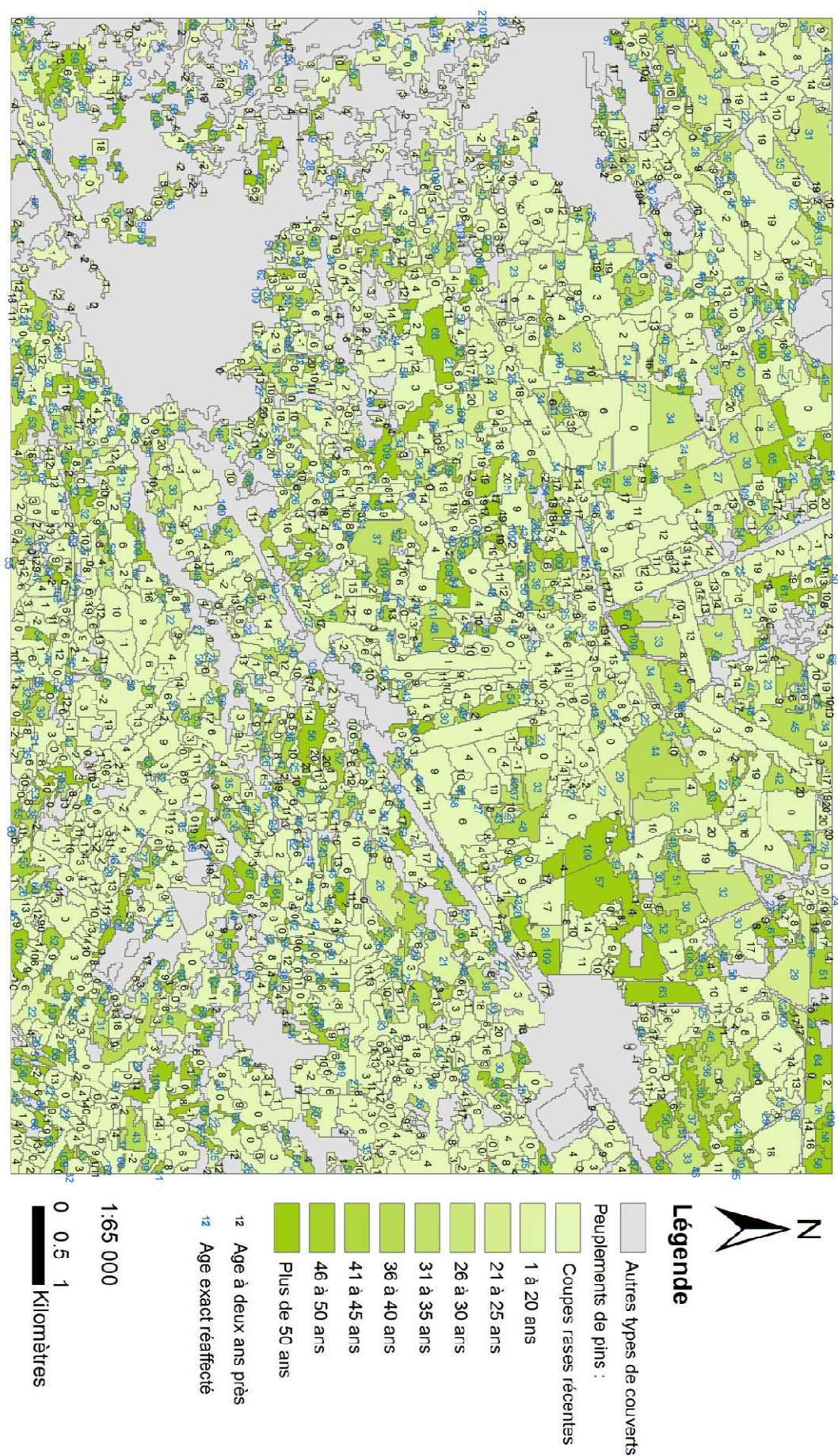
3.4.1 Evolution de l'hétérogénéité du paysage forestier entre 1987 et 2007

L'aire totale des deux sites étudiés est sensiblement égale. L'aire totale de chaque classe a déjà été commentée au paragraphe précédent (Figure III-10). Les indicateurs paysagers globaux, i.e. pour tous les groupements confondus, sont visibles en Figure III-11. Sur le bassin versant du Bouron, la taille moyenne des groupements, et l'indice de Simpson restent relativement constants sur la période étudiée. Le nombre de groupements est

Figure III-8 : Cartographie des âges des peuplements de Pin maritime en 2007 pour le bassin versant du Bouron



Figure III-9 : Cartographie des âges des peuplements de Pin maritime en 2007 pour le bassin versant du Tagon



légèrement inférieur en 1987 en comparaison des autres années et par conséquent l'aire maximale des groupements est plus importante. Sur le Tagon, l'année 2007 se distingue bien des deux autres années, avec une aire moyenne et maximale des groupements plus importante, qui se retrouve dans la diminution du nombre de groupements (plus de polygones voisins ont pu être fusionnés) et dans une diversité diminuée : l'indice de Simpson passe de 0.92 à 0.89.

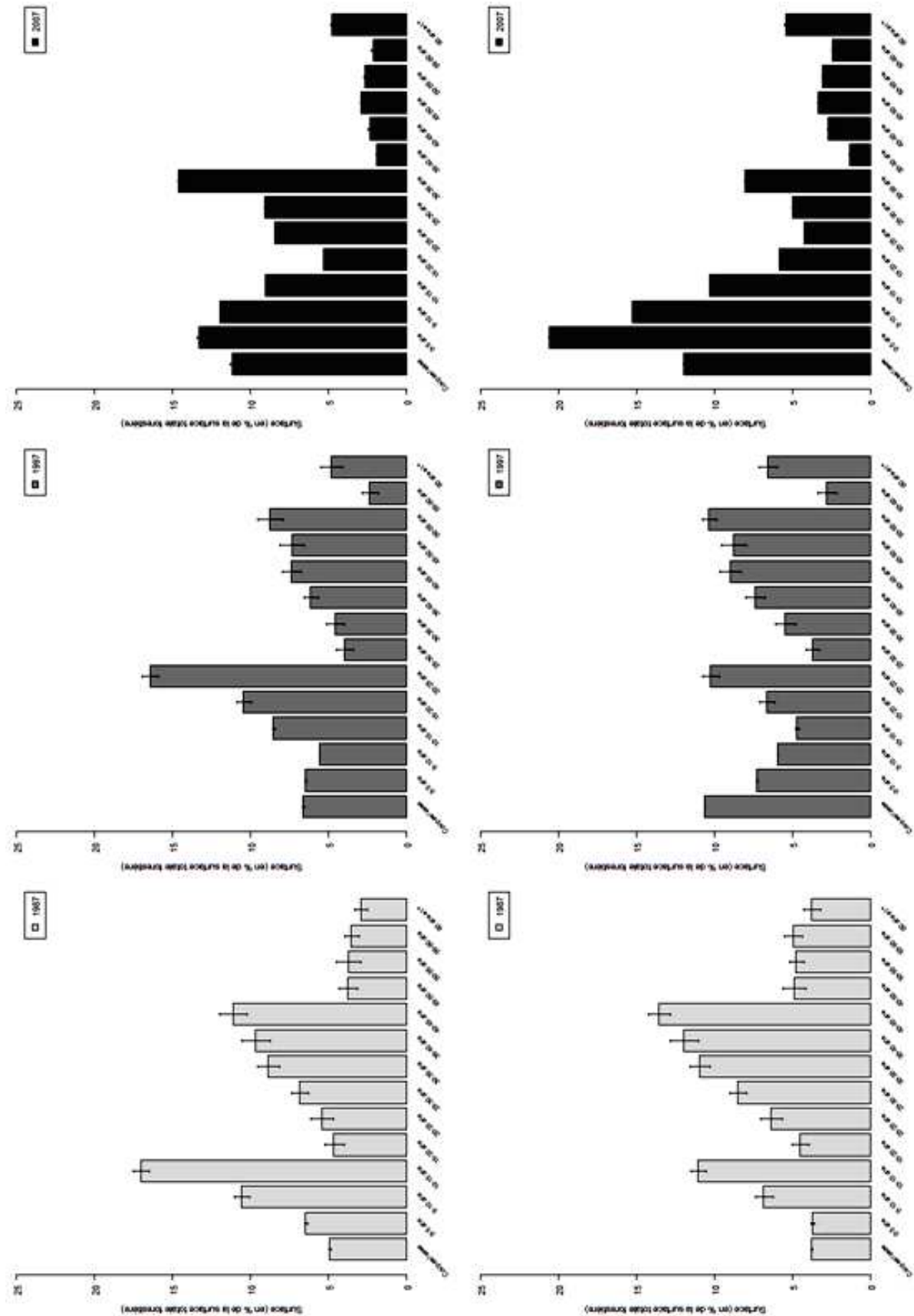
Les résultats par classe de 5 ans sont visibles en Figure III-12. Sur le bassin versant du Bouron, la dynamique des classes est identique entre les 3 années étudiées, avec un décalage de 10 ans entre chaque année (le pic de la classe "10-15 ans" en 1987 se retrouve avec un décalage de 10 ans en 1997 et de 20 ans en 2007), à la fois pour la taille moyenne, la taille maximale et le nombre de groupements par classe d'âge.

Sur le Tagon, les changements sont plus visibles, avec une augmentation de la surface moyenne des groupements de coupes rases, et une diminution importante de la surface moyenne des groupements les plus âgés entre 1987 et 2007. En effet, ce sont les parcelles les plus âgées qui ont été les plus touchées par la tempête Martin de 1999. La partie amont du bassin versant est gérée par des fonds d'investissements qui gèrent les parcelles selon un itinéraire technique standard en sylviculture du Pin maritime. Après la tempête de 2009, des observations sur le terrain ont montré que cette partie du site expérimental a été très réactive pour nettoyer les chablis. Les parcelles qui sont très âgées encore aujourd'hui, de taille plus petite, correspondent à des parcelles de gestion "patrimoniale" dont certaines sont encore en l'état depuis 1999. Le pic pour la classe 10-15 ans en 2007 est la résultante du pic de la classe 0-5 ans de 1997, qui correspond à l'exploitation des peuplements âgés de 1987 (voir paragraphe 4.4.4).

Dans notre cas, un nombre important de groupements va de pair avec une surface moyenne importante, qui semble témoigner d'une faible fragmentation du paysage. La variété, qui renseigne sur le nombre de types différents a été ici fixée a priori par le nombre de classes d'âge. Par le biais de l'indice de Shannon, l'analyse de ces deux composantes permet d'apprécier l'évolution de l'hétérogénéité des éléments du paysage au cours du temps. L'hétérogénéité est importante sur les paysages forestiers landais, et évolue faiblement dans le temps.

Cependant, si la fréquence des événements extrêmes de type tempête augmentait, les effets seraient cumulatifs, avec une érosion progressive de la diversité par le "rajeunissement" du paysage. Des études ont en effet démontré que les peuplements âgés et fertilisés (pratique généralisée depuis les années 70) sont plus sensibles à l'arrachement et au chablis (Cucchi et Bert, 2003 ; Cucchi, 2005). De même, la biodiversité du sous-bois en serait affectée, car elle est plus importante dans les peuplements âgés (Timbal, 1998), via l'effet combiné du facteur lumière et du facteur temps, i.e., le temps de recolonisation. Par conséquent, un paysage qui serait composé uniquement de jeunes peuplements est un paysage moins riche en espèces végétales mais aussi en espèces animales inféodées à certains types d'habitats.

Figure III-10 : Répartition de la surface, en pourcentage de la surface forestière totale de pin maritime, par classe d'âge pour le bassin versant du Bouron (Haut) et du Tagon, (Bas) évolution entre 1987 et 2007. Pourcentage moyen obtenu pour 20 simulations (tirages aléatoires), les barres d'erreur représentent 1 fois la déviation standard entre les 20 simulations.



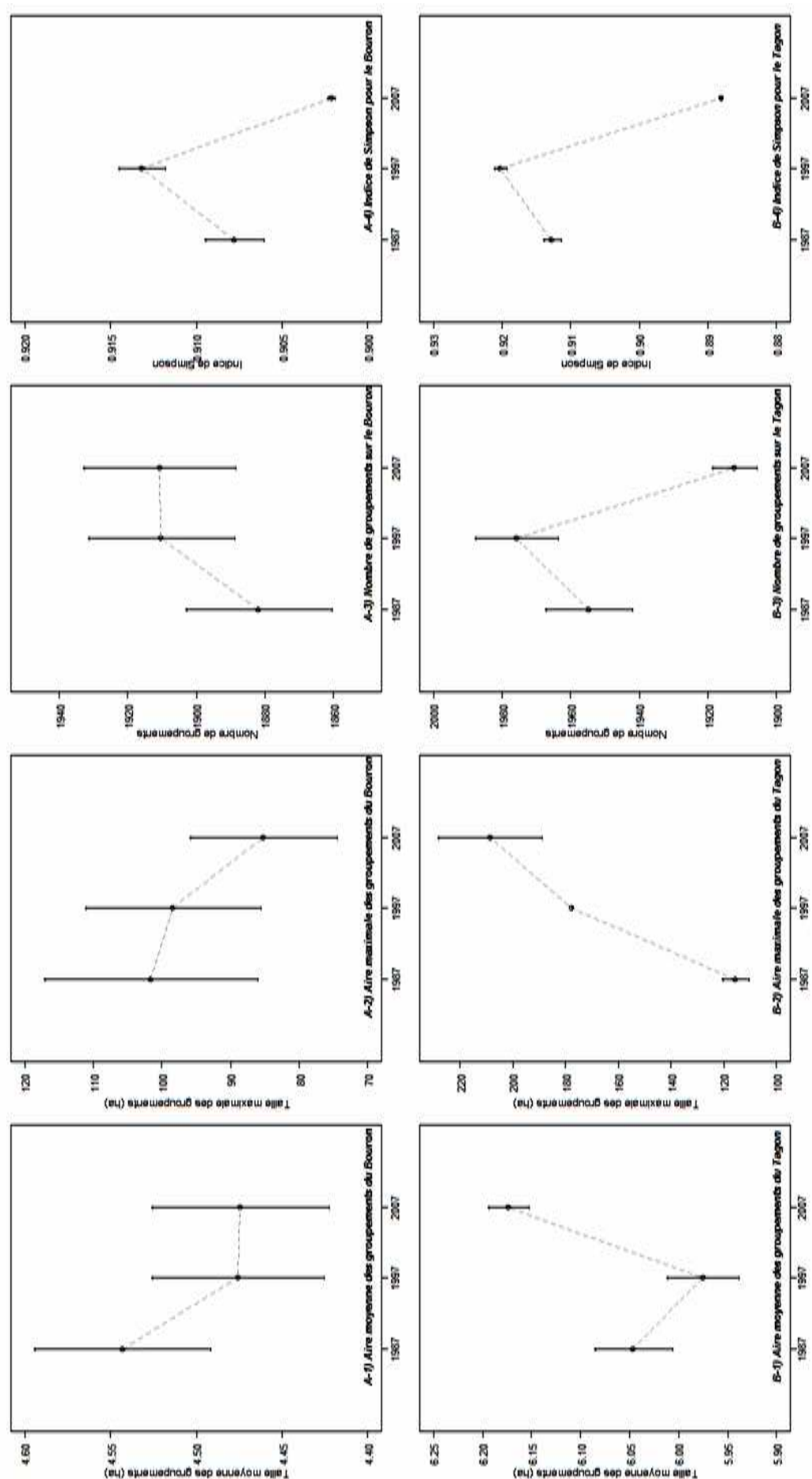
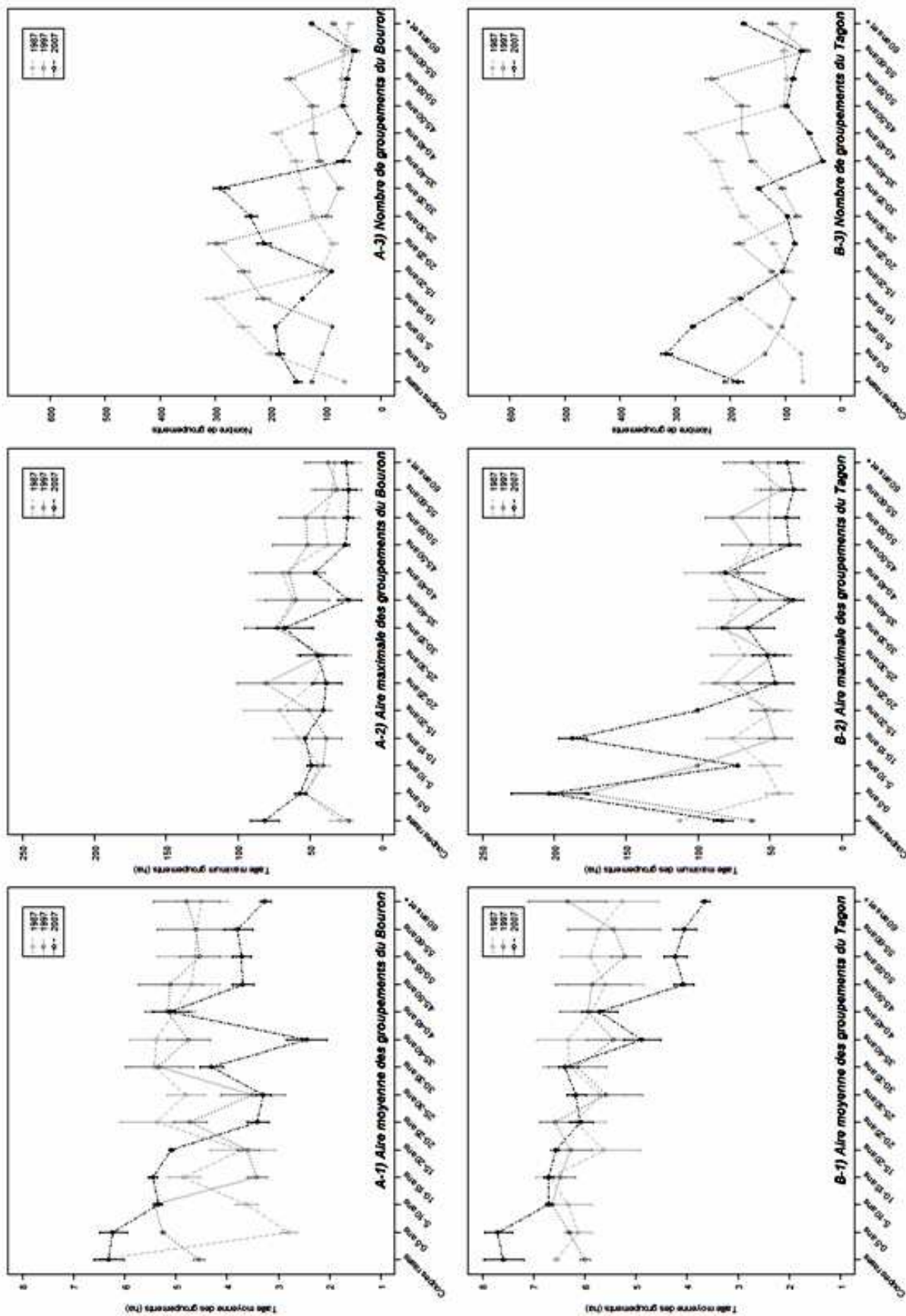


Figure III-11 : Aire moyenne des groupements (en hectares), Aire maximale des groupements (en hectares), Nombre de groupements et Indice de Simpson pour le bassin versant du Bouron (Haut) et du Tagon (Bas) : évolution entre 1987 et 2007. Valeurs moyennes obtenues pour 20 simulations, les barres d'erreur représentent 1 fois la déviation standard entre les 20 simulations.

Figure III-12 : Aire moyenne (en hectares, à gauche), Aire maximale (en hectares, au centre) et Nombre (à droite) de groupements (i.e., après fusion des polygones adjacents par classe d'âge de 5 ans) pour le bassin versant du Bouron (Haut) et du Tagon (Bas) : évolution entre 1987 et 2007. Valeurs moyennes obtenues pour 20 simulations, les barres d'erreur représentent 1 fois la déviation standard entre les 20



3.4.1 Evolution du bilan de carbone entre 1987 et 2007 sur les deux sites

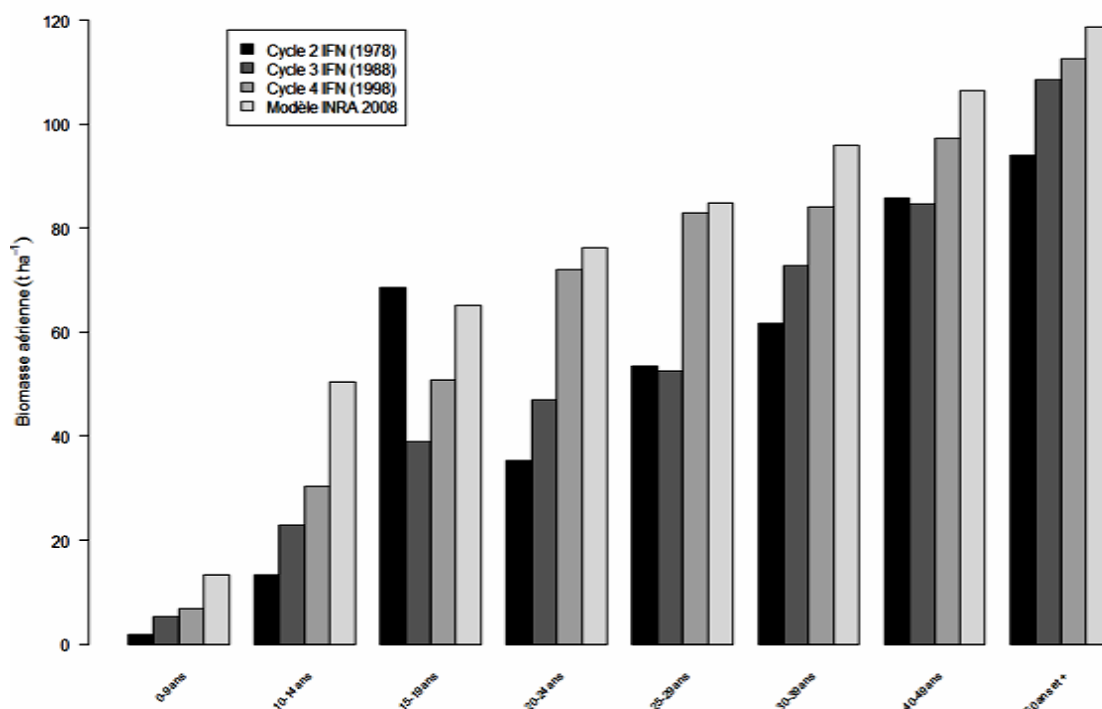


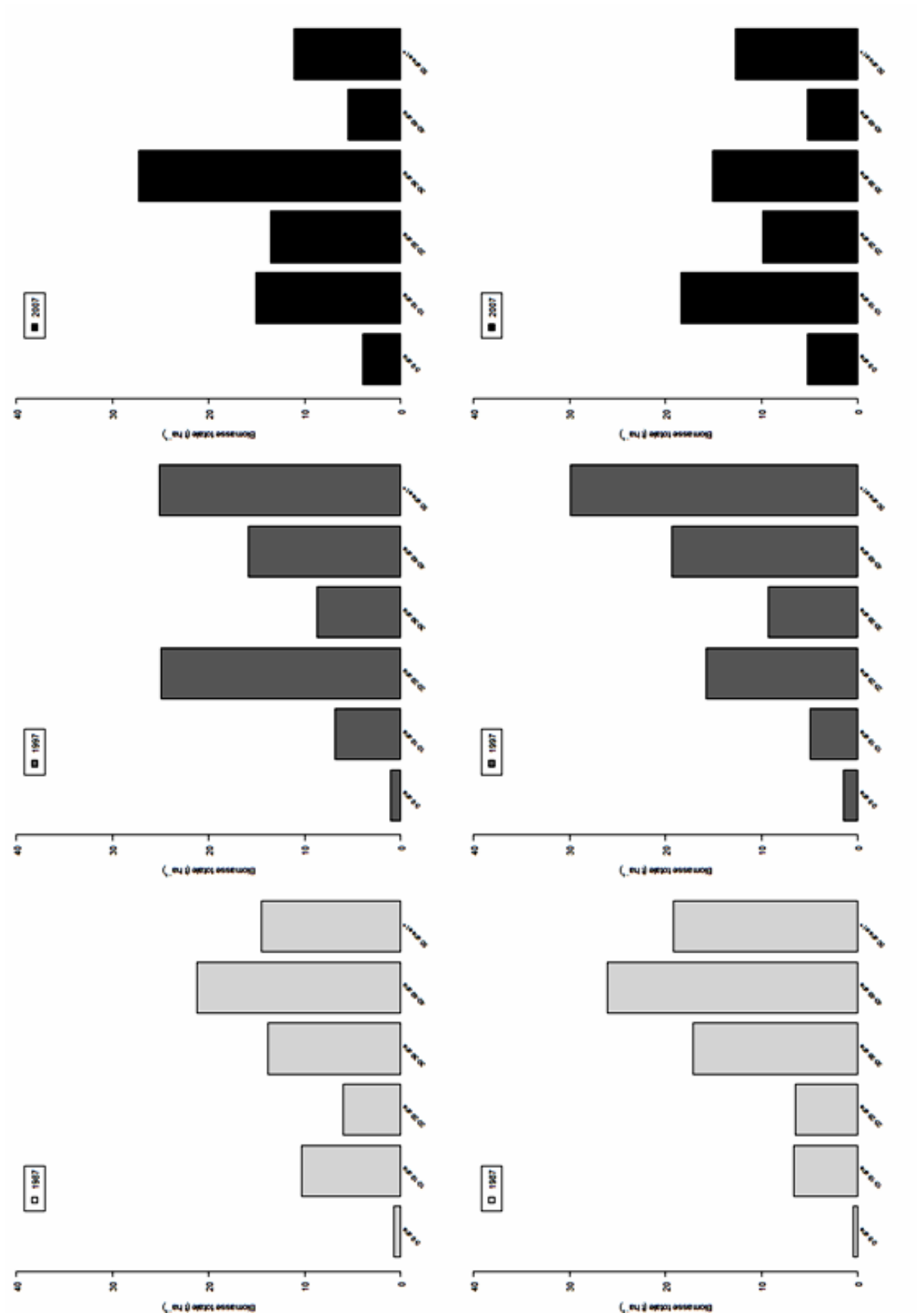
Figure III-13 : Biomasse aérienne en tonnes par hectare par classe d'âge : valeur moyenne de la classe pour les cycles 2 (1978), 3 (1988) et 4 (1998) des inventaires IFN pour la Gironde, valeur issue des données d'inventaires INRA pour 2008 sur les deux bassins versants (valeur pour le centre de classe, à partir du modèle défini au paragraphe 4.3.2).

Les valeurs de biomasse pour 2007 figurées sur la Figure III-13 correspondent à la valeur calculée à partir des données contemporaines (valeur pour l'âge du centre de classe). Elles montrent une progression régulière plausible en regard des valeurs issues des inventaires réalisés par l'IFN entre 1978 et 1998, grâce, principalement, à l'effet de l'amélioration variétale et des techniques. Le cycle 2 a été figuré à titre indicatif sur ce graphique, bien qu'il ne soit pas utilisé dans cette étude¹⁸. L'évolution de la biomasse est quasi-linéaire avec l'âge. Les valeurs concordent avec les mesures directes de biomasse aérienne réalisées par Porté et al. (2002) sur le Pin maritime : 9.2 t.ha⁻¹ pour un peuplement de 5 ans, 113 et 144.5 t.ha⁻¹ pour des peuplements de plus de 25 ans (26 et 32 ans respectivement).

La biomasse totale (biomasse aérienne et racinaire) immobilisée par chaque classe d'âge pour un hectare moyen pour les trois dates des inventaires, calculée pour les années 1987, 1997 et 2007, est visible dans la Figure III-13. Elle résulte du croisement de l'information sur la distribution de la biomasse par classe d'âge de la Figure III-13 et de

¹⁸ les données antérieures à 1988 ne sont pas utiles pour notre étude. De plus, le nombre de placettes d'inventaire dans chaque classe d'âge est parfois trop faible pour être représentatif de sa classe.

Figure III-14 : Contribution des classes d'âge à la biomasse totale pour un hectare moyen : biomasse totale rapportée à la surface forestière totale (Pin maritime) sur le bassin versant du Bouron (Haut) et du Tagon, (Bas), évolution entre 1987 et 2007.



l'information sur la distribution des surfaces par classe d'âge pour les deux bassins versants, Figure III-10.

Sur le bassin versant du Bouron, en 1987, les classes d'âge supérieur à 30 ans stockent la majorité de la biomasse. De même, sur le bassin versant du Tagon, en 1987, très peu de biomasse est immobilisée dans les jeunes peuplements (toujours inférieure à 10 t.ha⁻¹). En 1997, les classes d'âge "20-29 ans" pour le Bouron et "50 ans et plus" pour les deux bassins versants sont les classes qui immobilisent le plus de biomasse. En 2007, sur le Bouron, les classes d'âge les plus âgées continuent de concentrer la majeure partie de la biomasse, avec le pic des "10-19" ans de 1987 et des "20-29 ans" de 1997 qui se retrouve dans les "30-39 ans" cette année là. La contribution des classes d'âge supérieur à 40 ans a en revanche diminué.

La situation est très différente sur le Tagon, avec en 2007, une biomasse qui se redistribue presque à part égale autour de l'âge 30 ans. La biomasse stockée dans les plus vieux peuplements devient inférieure à celle stockée par les classes d'âge de moins de 20 ans. Le rajeunissement de la distribution des surfaces vers les classes d'âge les plus jeunes (paragraphe 4.4.4) s'accompagne donc d'un effet visible sur le stock de carbone qui est déséquilibré, car à l'opposé de la répartition habituelle, c'est-à-dire davantage stocké dans les classes d'âge les plus âgées.

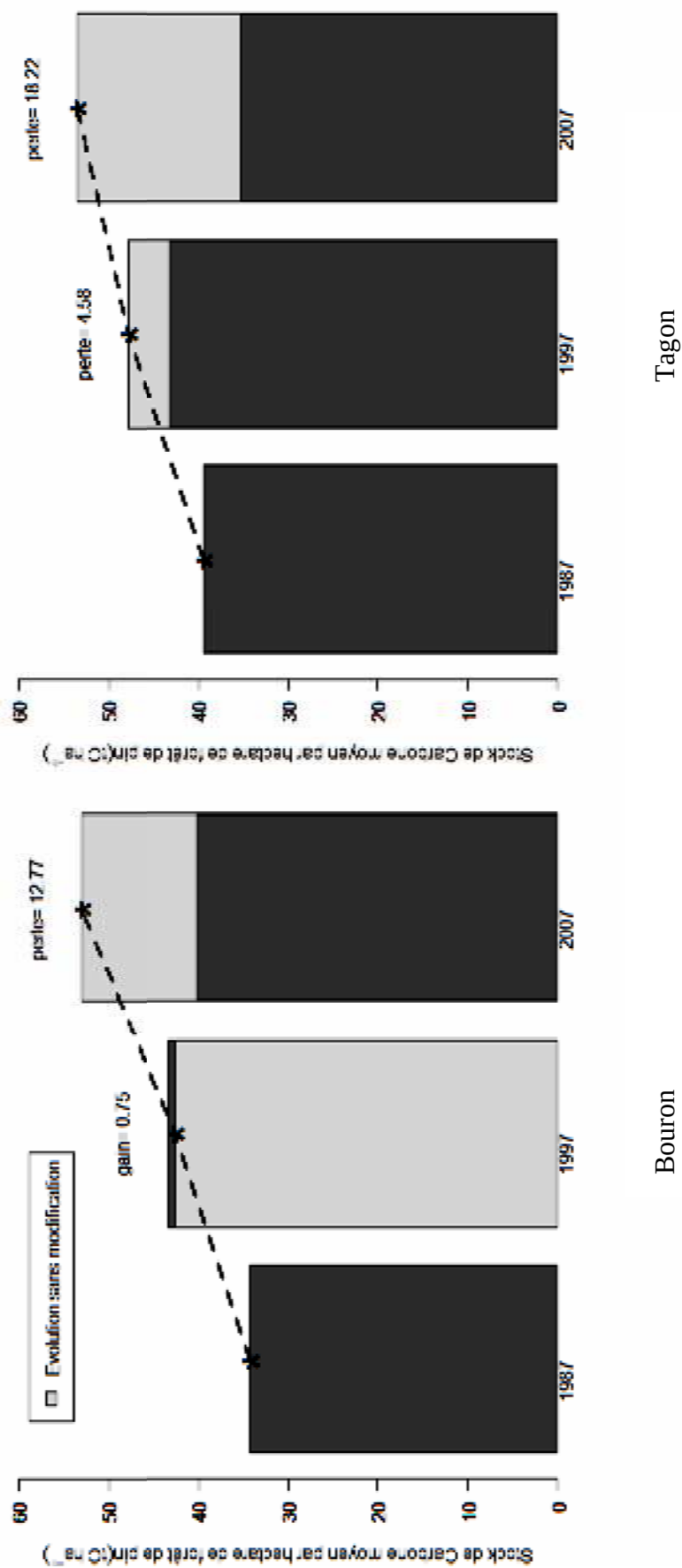
Les résultats rapportés à la surface forestière de Pin maritime totale, c'est-à-dire le stock de carbone moyen pour chaque hectare de pin est visible sur la Figure III-15.

Pour les deux bassins versants, l'évolution réelle entre 1987 et 1997 est une progression régulière. La forêt de Pin maritime stocke du carbone sur cette période. L'effet des prélèvements est visible sur le Tagon. Comme cela a déjà été constaté auparavant, en 1987, les forêts en âge d'exploitation représentaient une grande part du bassin versant et les surfaces en coupes rases augmentaient logiquement en 1997. Pour le bassin versant du Bouron, les effets de l'amélioration variétale et des techniques surcompensent les prélèvements : malgré les coupes, le stock de carbone est plus important en 1997 que ce qu'il aurait été si les peuplements de 1987, toutes conditions étant égales par ailleurs, avaient été maintenus à l'identique jusqu'en 1997 (mais avec 10 ans de plus).

En 2007, la quantité de carbone stockée en moyenne par hectare diminue. La différence entre l'évolution naturelle issue de l'état 1997 et l'état effectif en 2007 est très visible. L'effet cumulé des exploitations et de la tempête entraîne une réduction plus importante sur le Tagon (18.31 tC.ha⁻¹) que sur le Bouron (12.76 tC.ha⁻¹) par rapport à l'évolution naturelle en absence de perturbations.

En 1997, le stock de carbone moyen est égal à 39.28 tC.ha⁻¹ pour le Bouron et 39.35 tC.ha⁻¹ pour le Tagon. Ces valeurs sont plus faibles que celles trouvées par Meredieu et al. (2005) qui trouvaient pour le département de la Gironde : 52 tC.ha⁻¹ en 1988, 58 tC.ha⁻¹ en 1999 et 42 tC.ha⁻¹ en 2000. Cependant, leurs calculs reposaient sur la conversion du volume de bois fort IFN (via l'utilisation de facteurs d'expansion et de conversion), et l'auteur estime l'erreur sur cette valeur de plus ou moins 15 %. De plus, l'IFN ne calcule pas de volume sur les placettes pour lesquelles le DBH moyen est inférieur à 23.5 cm. Par conséquent, la

Figure III-15 : Carbone moyen stocké par hectare de forêt de pin maritime sur les bassins versants du Bouron (à gauche) et du Tagon (à droite), évolution entre 1987 et 2007. La partie gris clair et les étoiles représentent l'évolution si aucun changement n'avait eu lieu depuis la précédente période (pas d'amélioration variétale, pas de modification de l'itinéraire technique, pas d'exploitation).



biomasse moyenne à l'hectare peut-être surestimée si elle se base sur le volume de bois fort IFN uniquement.

Quelques limites peuvent aussi être relevées dans le cas de cette étude. Les relations allométriques sur lesquelles se basent nos calculs correspondent à l'état de l'art (Shaiek et al., 2011), elles peuvent aussi être remises en cause pour les classes d'âge extrêmes. En effet, elles ont été mises au point pour des peuplements de 9 à 50 sur lesquels la biomasse a été mesurée. Par ailleurs, Bert et Danjon (2006), semblent remettre en cause la valeur de 0.5 tC/t biomasse, pour le Pin maritime, qui sous-estimerait de 6% le stock pour cette espèce. Une autre approche pour estimer le stock de carbone à l'échelle d'une région est d'utiliser la télédétection pour dériver directement des paramètres tels que volume ou biomasse, avec l'avantage de pouvoir prendre en compte la biomasse du sous-bois, visible au travers des couronnes. Cependant, pour les données radar ou optique, le signal sature au delà d'une certaine gamme (une augmentation de la biomasse ne correspond plus forcément à un changement de la signature spectrale, Patenaude et al., 2005, Powell et al., 2010). Etant donné le faible succès de la classification orientée objet non améliorée par la carte des coupes rases de l'IFN, cette méthode semble peu prometteuse dans le cas des couverts forestiers de Pin maritime du Massif Landais. La technologie LiDAR semble plus appropriée mais n'est pas pleinement encore disponible sur les plateformes satellitaires. Enfin, notre méthode repose sur des mesures ponctuelles (inventaire terrain) qui ne correspondent qu'à l'état à un instant donné. Le calcul des bilans n'a été réalisé que pour les années pour lesquelles les données d'inventaire étaient disponibles. La modélisation de la croissance des peuplements permettrait, entre deux inventaires, de prendre en compte les effets climatiques annuels mais aussi la biomasse immobilisée dans le sous-bois. La nouvelle méthodologie (IFN, 2009) d'inventaire de l'IFN pourrait aussi permettre une meilleure prise en compte de la variabilité interannuelle.

3.5 Conclusion

La cartographie des classes d'âge en 2007 par un traitement d'images SPOT orientée objet, si elle a permis d'avoir accès à un nombre plus important de classes que ce qui a été obtenu par le passé avec des méthodes pixel à pixel, pour les couverts de Pin maritime, n'a pas atteint la fiabilité escomptée. L'originalité, ici, a été de compléter cette première carte par les informations apportées par la carte des coupes rases 1984-2006 de l'IFN. Celle-ci a en effet permis d'affiner la connaissance des âges pour les peuplements de moins de 21 ans.

La méthodologie proposée pour réaffecter un âge à l'ensemble des parcelles à partir des distributions statistiques de l'IFN a permis d'avoir une information continue dans le temps et dans l'espace. La reconstitution anti-chronologique de l'âge de 1985 à 2007, basé sur cette carte en 2007, a mis en évidence des modifications importantes sur la structure des âges des peuplements suite à la tempête Martin de 1999 sur le site du Tagon, par intercomparaison avec le site du Bouron, situé dans une zone moins balayée par la tempête. Deux applications possibles de cette cartographie ont été abordées dans ce chapitre. Cette carte a permis tout d'abord le calcul de métriques propres à l'étude du paysage, afin d'analyser l'hétérogénéité spatiale et temporelle des peuplements de Pin maritime d'âges différents. Enfin, elle a servi de base au calcul du bilan de carbone à l'échelle des bassins versants, pour plusieurs années et a permis de mettre en évidence les effets de la gestion sylvicole et des événements climatiques extrêmes de type "tempête" sur sa dynamique temporelle. La méthodologie utilisée ici nous semble la plus fiable dans l'état actuel des connaissances et des techniques pour l'estimation des bilans de carbone à l'échelle d'une petite région forestière dans le Massif Landais. Un troisième type d'application de ces cartes sera abordé dans le chapitre VI, dans lequel nous testons la sensibilité de la recharge, i.e. le flux d'eau entrant dans le système aquifère, aux différents types de couverts à l'échelle du bassin versant du Bouron.

Au vu du large spectre d'applications possibles des cartes obtenues, il est important de continuer l'effort de production des cartes des coupes rases annuelles de l'IFN. En effet, la rotation sylvicole dure en moyenne 40 ans (avec une tendance au raccourcissement ces dernières années pour la production de bois-énergie), ainsi, dans 20 ans (et même moins si les événements de type "tempête" se multiplient), l'âge à un ou deux ans près de la grande majorité des peuplements de ce massif de plus d'un million d'hectares sera connu.

Chapitre IV

Etude de la productivité et de la croissance du Pin maritime en fonction de la profondeur de nappe plio- quaternaire

" Mais c'est vrai que j'ai toujours été fasciné par l'arbre. Le motif végétal est un motif qui est central chez moi, l'arbre est là. Il est partout, il m'inquiète, il m'intrigue, il me nourrit."

Aimé Césaire (Présence Africaine, N°126, 1983)

IV. Table des matières

4.1	Introduction.....	123
4.2	Matériel et Méthodes	127
4.2.1	Données piézométriques.....	127
4.2.2	Données forestières in-situ	128
4.2.2.1	Choix des sites de mesure	128
4.2.2.2	Données d'inventaire forestier.....	129
4.2.2.3	Données dendrochronologiques	131
4.2.3	Données météorologiques	131
4.2.4	Analyse des données	132
4.2.4.1	Etude des types de landes.....	132
4.2.4.2	Biomasse.....	132
4.2.4.3	Croissance.....	133
4.3	Résultats	137
4.3.1	Analyse des données piézométriques	137
4.3.2	Caractérisation des parcelles.....	137
4.3.3	Effet de la hauteur de nappe sur la biomasse.....	141
4.3.4	Surface terrière, Sensibilité et Autocorrelation pour le Pin maritime	141
4.3.5	Effet des variables hydro-climatiques sur la croissance.....	143
4.3.6	Variabilité de la croissance en fonction des types de landes.....	148
4.4	Discussion	151
4.5	Conclusion	158

4.1 Introduction

La croissance secondaire des arbres est un processus qui conduit à la formation du bois et qui est sensible aux changements environnementaux. L'analyse, par mesure et datation, des cernes de croissance annuels pour comprendre la variation des paramètres environnementaux tout au long de la vie de l'arbre, constitue le thème de la dendrochronologie. De nombreuses études dendrochronologiques ont démontré l'influence de l'âge, du climat et de la sylviculture sur la formation des cernes annuels (Fritts, 1971 ; Fritts, 1976 ; Schweingruber, 1990 ; Bert, 1993). L'hypothèse sous-jacente commune à toutes ces études est la continuité des processus conduisant à la formation d'un cerne : l'effet des variables environnementales et biologiques sur la croissance demeure le même dans le passé comme au présent ("*Uniformitarian Principle*" ; Hutton, 1788, cité dans Hughes, 2002). Par exemple, la quantité d'eau disponible au cours de la saison de croissance active les mêmes processus biologiques et, influence, de la même façon aujourd'hui, la croissance radiale des arbres, la taille du cerne annuel, sa distribution autour du tronc, la durée de croissance cambiale, la proportion de xylème formé, le moment de l'initialisation et la durée de formation du bois d'été ainsi que l'épaisseur de la zone de transition entre bois d'été et bois d'hiver, que par le passé. Ainsi, à partir de l'analyse de la succession des cernes, l'information sur les changements écologiques, i.e. le milieu local, ou sur les changements environnementaux, i.e. le climat présent et passé, peut être reconstituée (Fritts, 1971).

La communauté des climatologues s'intéresse depuis longtemps aux enregistrements contenus dans les cernes des arbres, qui constituent un proxy pour la reconstitution des variables climatiques et l'étude de leur l'impact sur la croissance des arbres (Mérian et Lebourgeois, 2011). L'intérêt de la communauté des hydrologues est plus récent et un nombre grandissant d'études s'intéressent tout particulièrement à la reconstruction des chroniques de débit. Initiée en Amérique du Nord (Woodhouse et Lukas, 2006), cette méthodologie s'est peu à peu étendue dans tous les endroits du globe où les chroniques de mesures instrumentales sont trop récentes pour connaître les conditions historiques (Pederson et al., 2001 ; Lara et al., 2005 ; Brookhouse et al., 2008 ; Boninsega et al., 2009 ; D'Arrigo et al., 2011). Les variables hydrologiques sont susceptibles d'expliquer davantage la variabilité de la largeur des cernes annuels, puisqu'elles prennent en compte les phénomènes d'infiltration et de rétention d'eau, qui sont négligés lorsque les précipitations seules sont utilisées pour le calcul de la quantité d'eau disponible pour les arbres (Ford et Brooks, 2003). Cependant, une variable comme la mesure du débit à un exutoire ne traduit pas toujours la situation hydrique de chaque arbre sur l'ensemble du bassin versant drainé. Selon la proximité au réseau de drainage, le statut hydrique des sols peut être très différent. L'utilisation du niveau de nappe semble plus appropriée, même si les chroniques sont rares, courtes ou inexistantes dans la plupart des pays (Ford et Brooks, 2003).

Pourtant, les effets de la profondeur de nappe par rapport au sol sur les performances des arbres sont relativement bien connus. La présence de la nappe à l'affleurement peut être

néfaste aux arbres (anoxie), même si ces conditions sont souvent rencontrées pendant les périodes hivernales où les arbres sont dormants ou faiblement actifs (Spurr et Barnes, 1980). Les effets négatifs de l'engorgement en eau sur la croissance sont couramment rencontrés dans les zones inondables ou marécageuses. Polacek et al. (2005) ont montré que la diminution du niveau de l'eau dans les rivières, et donc du niveau de la nappe, favorise la croissance du Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), une espèce intolérante aux inondations, dans le bassin de la rivière Lech (Alpes autrichiennes). Dans d'autres cas cependant, la nappe phréatique constitue un réservoir pour les racines des arbres lorsqu'elle se trouve proche de la surface, soit par prélèvement direct dans la zone de battement de la nappe, soit, via l'apport des remontées capillaires. Robertson (1992) s'est intéressé à l'effet de la variation de la profondeur de nappe sur la croissance des Chênes (*Quercus sp.*) et des Caryers (*Carya sp.*) aux Etats-Unis. L'étude a démontré que l'accroissement des arbres cesse dès que la nappe atteint sa profondeur maximale, et que l'incrément radial annuel est négativement corrélé à la profondeur de la nappe. Fraser (1962) a montré que l'humidité du sol était directement reliée à la profondeur de la nappe sur des sites très secs à très humides, ainsi qu'à la croissance radiale, l'initiation et la cessation de l'activité cambiale pour l'Epinette blanche (*Picea glauca*) et le Bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*). Ces prélèvements sont parfois très importants : une étude en Floride a ainsi démontré que la suppression du couvert forestier (*Pinus taeda*) augmente de 32 à 41 cm la hauteur de la nappe par rapport au témoin (Sun et al., 2000). Enfin, les effets peuvent être complexes, comme dans l'étude de Ford et Brooks (2003) : la croissance du Pin d'Elliott (*Pinus elliotii* var. *densa*) est positivement corrélée avec une profondeur de nappe faible au cours du printemps de l'année de végétation en cours, et très négativement corrélée à l'affleurement de la nappe en hiver.

Le Pin maritime est une espèce peu utilisée pour les études dendrochronologiques. Pourtant, cette espèce répandue sur tout le pourtour méditerranéen et sur la côte Ouest de la France est bien adaptée pour l'analyse des effets du climat sur la croissance des arbres (Bogino et Bravo 2008). En Espagne, les chroniques de largeur de cerne de cette espèce ont été utilisées comme proxy pour reconstituer les précipitations estivales de la côte Est (Richter et Eckstein, 1990). De même au Maroc, Nefaoui (1996) a mis en évidence la corrélation entre la croissance et la pluviométrie, mais aussi avec la capacité de rétention en eau des sols. Au Portugal, les pins de moins de 65 ans se sont révélés sensibles au climat, et leur croissance positivement corrélée aux pluies automnales (Viera et al., 2009). En revanche, les précédentes études sur cette espèce en France n'ont pas montré de bonnes corrélations entre les variables climatiques et la largeur du cerne de l'année (Bert, 2006), bien que certaines années caractéristiques (sécheresse ou abondante pluviométrie) aient pu être identifiées (Vauchel, 1996). Aucune étude n'a mis en évidence la corrélation entre des chroniques de profondeur de nappe et de largeur de cerne annuelles. Pourtant, la quantité et la disponibilité de l'eau est déterminante au cours de la saison de croissance, car elle influence l'épaisseur du cerne et le nombre de cycles de croissance de l'année en cours (Demounem et al., 1970 ; David, 1974). De plus, comme c'est le cas pour d'autres espèces (Ford et Brooks, 2003), le Pin maritime

possède trois cohortes d'aiguilles (Porté et al., 2000) préformées en bonne partie dans le bourgeon au cours de l'année précédente et la croissance de l'année en cours dépend aussi des conditions météorologiques et hydriques des années précédentes. Ainsi, les effets rétroactifs de l'année précédente ne doivent pas être négligés.

Les racines du Pin maritime dans la région des Landes de Gascogne explorent majoritairement les 3 premiers mètres du sol (Danjon et al., 2005). Cette profondeur peut être plus réduite sur les sites de lande humide, avec un maximum entre 0.8 et 1 mètre au dessous du sol (Bakker et al., 2006). Par conséquent, les arbres se trouvant sur des sites où la nappe est toute l'année sous le plancher racinaire peuvent être plus sensibles à un déficit pluviométrique, toutes conditions étant égales par ailleurs (même itinéraire technique, même variétés améliorées). Bien que la conductance stomatique du Pin maritime soit très sensible aux conditions climatiques et que cet arbre possède un fort pouvoir de régulation de sa transpiration dès les premiers stades de stress hydrique (Gash et al. 1989 ; El Hadj Moussa, 1989 ; Loustau et al., 1990 ; Berbigier et al., 1991 ; Granier et Loustau, 1994 ; Moreaux et al., 2011), un stress quasi-permanent entraîne une moindre croissance. Loustau et al. (1999) en se basant sur les données d'inventaire de 1988, montrent que les landes de type mésophile, naturellement favorables au Pin maritime, sont les plus productives. Chaperon et Crémère (1994) estiment que les landes humides bien drainées sont encore plus favorables, en raison de la forte teneur en matière organique des sols. Cependant, aucune étude n'a tenté de quantifier si la différence de biomasse et de croissance est plus marquée en fonction de l'âge et du gradient de profondeur de nappe. La relation entre profondeur de nappe et croissance du Pin maritime peut être complexe comme dans le cas de Ford et Brooks (2003) : une nappe trop superficielle en hiver peut aussi avoir des effets négatifs sur la croissance des arbres (Loustau et al., 1999).

L'objectif de ce travail est de comprendre les effets de la variation de la profondeur de la nappe phréatique sur la croissance du Pin maritime dans la région des Landes de Gascogne, à la fois sur la quantité de biomasse totale et sur les variations de croissance annuelle liées au climat.

Les questions principales abordées dans ce chapitre sont : (1) existe-il une relation significative entre les performances du Pin maritime et la hauteur de nappe, et (2) les peuplements présentent-ils une sensibilité différente en fonction de leur âge pour un même type de site.

Dans un premier temps, la caractérisation de la biomasse à la parcelle est réalisée à partir d'inventaires forestiers, afin de quantifier les différences de productivité sur les différentes stations forestières. Puis, une analyse dendrochronologique de l'accroissement annuel des arbres est conduite et une analyse des corrélations avec les variables hydroclimatiques est menée, afin de discriminer les effets attribuables au climat et ceux attribuables aux conditions hydrologiques locales.

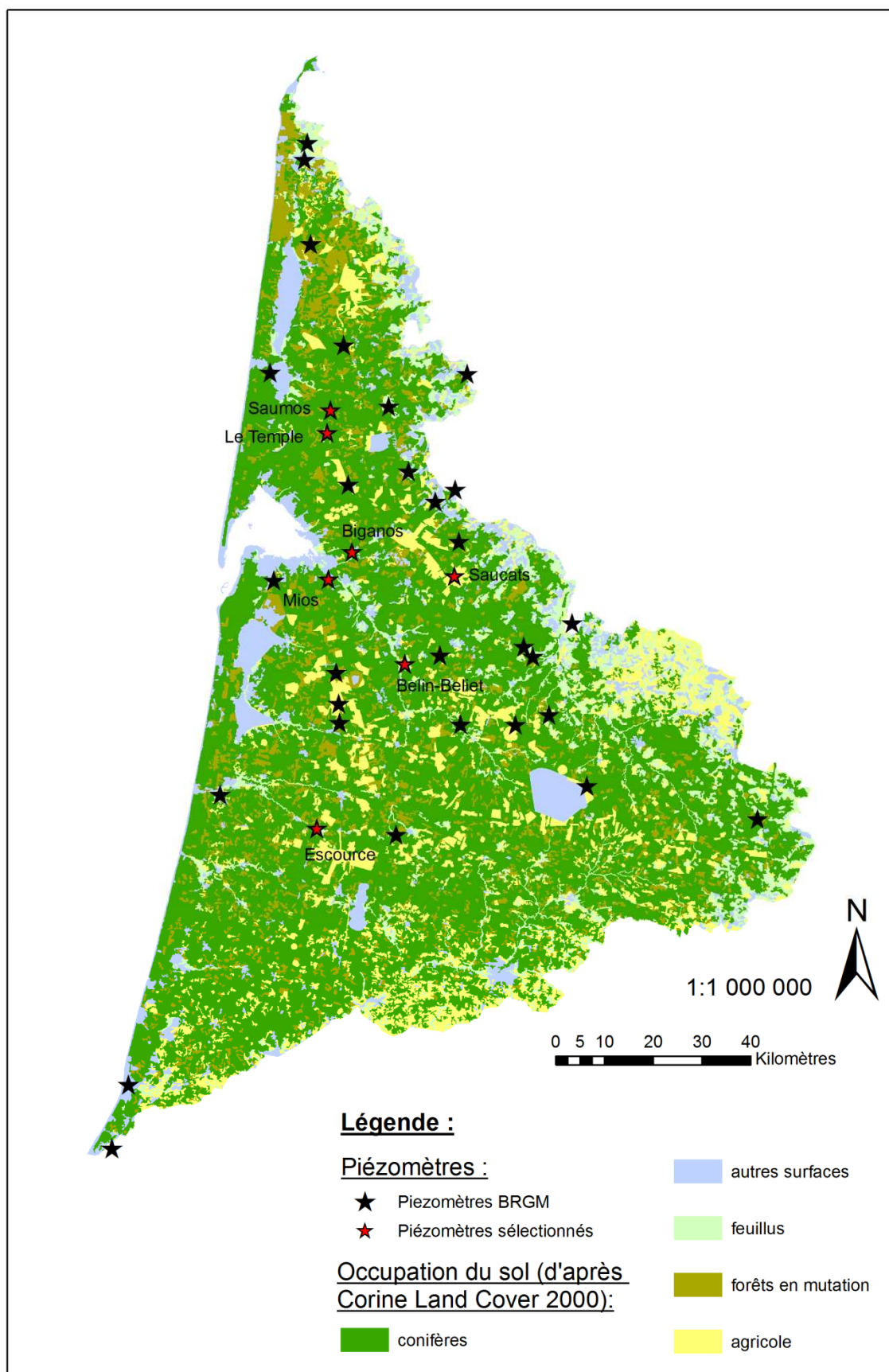


Figure IV-1 : Localisation des piézomètres suivis par le BRGM sur l'ensemble du Massif landais et des sept piézomètres sélectionnés pour l'étude de l'effet de la hauteur de nappe sur la productivité du Pin maritime

4.2 Matériel et Méthodes

Le protocole d'échantillonnage et la méthodologie de traitement des données a été mise en place en mai 2008 avec l'aide de D. Bert (Unité BIOGECO, Centre INRA Bordeaux). Les campagnes terrain et la création de la base de données dendrométriques ont été réalisées dans le cadre du stage de L. Fernandez (Fernández de Uña, 2009a).

4.2.1 Données piézométriques

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) est gestionnaire de 36 piézomètres répartis sur le massif des Landes de Gascogne, qui assurent un suivi de la nappe plio-quaternaire. Les données sont accessibles en ligne via le portail d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (ADES, <http://www.ad.es.eaufrance.fr/>, dernier accès le 21/01/2011).

Sept piézomètres disponibles sur la base ADES ont été sélectionnés pour cette étude (Figure IV-1), selon des critères de distance (délai de route inférieur à 1 heure) et du temps disponible pour cette expérimentation (stage de 4 mois de L. Fernández), avec au moins deux répétitions par type de station forestière, représentatives d'une classe de profondeur de nappe (Augusto et al., 2006, voir Chapitre II). Il s'agit des piézomètres situés sur les communes de Belin-Beliet (33) et Escource (40) pour les stations de lande sèche, de Biganos (33) et Saucats (33) pour les stations de lande mésophile, de Saumos (33), du Temple (33) et de Mios (33) pour les stations de lande humide (Figure IV-2).

Les chroniques piézométriques n'ont pas la même durée d'un site à l'autre. Le Tableau IV-1 résume les données disponibles sur la base ADES et les principales caractéristiques des piézomètres. Par convention, les valeurs utilisées par la suite sont toujours négatives puisqu'il s'agit de profondeur par rapport au sol. La fréquence de mesure s'échelonne entre 1 valeur par mois à 1 valeur par jour, selon les sites, souvent variable dans un même jeu de données (les données historiques les plus anciennes ont une fréquence moins importante).

Tableau IV-1 : Profondeur minimale, moyenne et maximale (m) atteinte durant la période de mesure pour les sept piézomètres sélectionnés pour l'étude. Seule la date de début des mesures est indiquée : les mesures continuent toujours en 2011.

	Saumos	Le Temple	Biganos	Mios	Saucats	Belin-Beliet	Escource
Code_BSS	08022X0004/F	08025X0009/P	08266X0003/F	08502X0104/F	08511X0036/F1	08744X0005/PZE	08986X0052/PZ
Date début	oct. 1997	oct. 1975	déc. 1986	oct. 1989	sept. 1969	janv. 1976	juin 1992
Min	1.3	1.93	2.58	1.75	5.14	5.93	10.43
Mean	0.70	0.88	1.43	0.92	2.12	4.89	9.65
Max	0.04	0.01	0.67	0.07	0.3	2.84	7.66

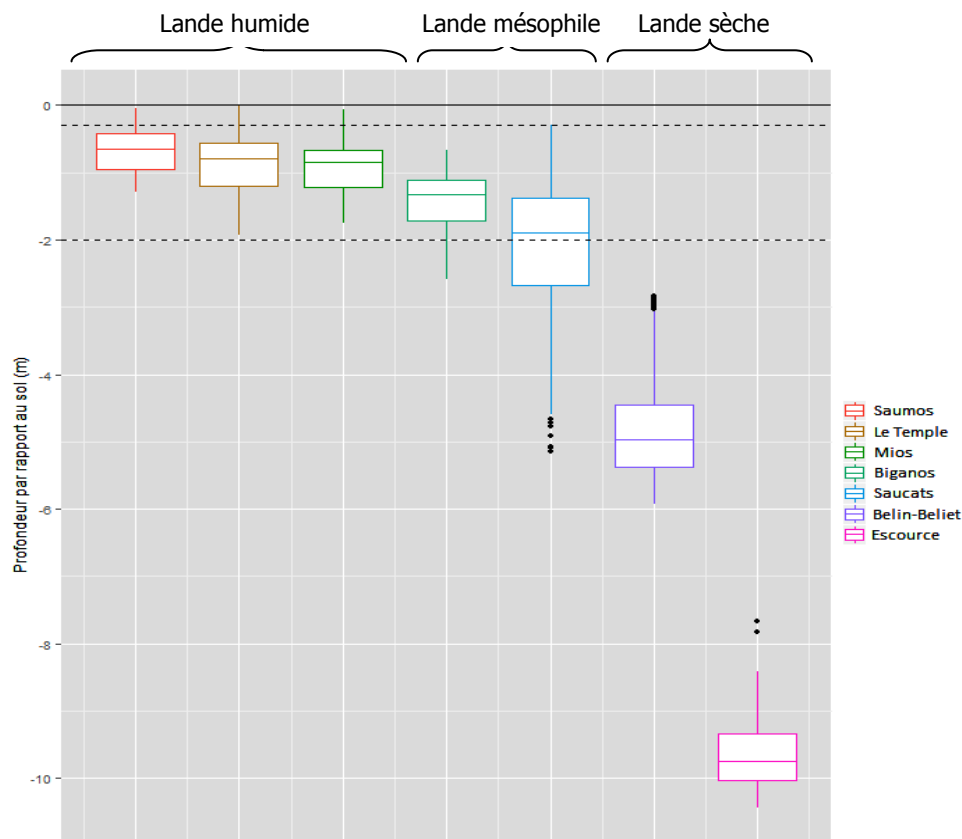


Figure IV-2 : Profondeur de la nappe pour les piézomètres sélectionnés et classe des stations forestières correspondantes, selon les critères d'Augusto, 2006. Les boîtes à moustaches représentent la valeur médiane (ligne), le 25^{ème} percentile et le 75^{ème} percentile (bordures de la boîte), la longueur des moustaches vaut 1,5 fois la distance inter-quartile, selon les conventions de Tuckey. Les points correspondent aux valeurs hors de cette distribution.

Les piézomètres échantillonnés couvrent une gamme de profondeur de nappe allant de -10.43 mètres au dessous de la surface du sol au minimum pour Escource, à une nappe quasiment à l'affleurement au maximum (-0.01 m pour Le Temple, -0.04 m pour Saumos, et -0.07 m pour Mios). Le piézomètre d'Escource présente la série temporelle la plus courte. La série Saucats est la plus longue et constitue 41 années de mesures quasi continues. La chronique piézométrique de Belin-Beliet est la plus partielle avec plusieurs années manquantes en début de série (1977 à 1989, puis 1991-1995).

4.2.2 Données forestières in-situ

4.2.2.1 Choix des sites de mesure

L'analyse de photos aériennes (Geoportail) a permis de localiser et de délimiter des parcelles de Pin maritime équiennes et monospécifiques, dans un rayon d'un kilomètre autour du piézomètre. Ce cercle correspond à la zone de confiance autour de laquelle, les variations topographiques étant faibles, le niveau de la nappe peut être considéré comme identique au niveau mesuré dans le piézomètre (P. Corbier, BRGM, communication personnelle). A

l'intérieur de ce périmètre, plusieurs parcelles candidates ont été identifiées par type d'âge : forêt de pins matures, forêt de pins d'âge pré-mature et forêt de pins juvéniles. Ce rayon a été doublé pour un piézomètre (Saucats) en raison du grand nombre de parcelles agricoles autour du forage, et afin d'obtenir un nombre suffisant de parcelles potentielles.

Les critères pour déterminer l'âge des peuplements candidats par photo-interprétation sont les suivants :

- Peuplements juvéniles : les lignes de plantation sont nettes, avec parfois du sol nu visible (canopée ouverte).
- Peuplements d'âge pré-matures : les arbres sont en lignes visibles, mais la canopée est fermée.
- Peuplements matures : les arbres peuvent être disposés en ligne ou sans organisation spatiale (semis artificiels ou naturels) et la densité est faible. Le sous-étage est visible mais les couronnes sont larges.

Les parcelles candidates doivent avoir une superficie supérieure à 1 hectare, avec une largeur et une longueur supérieures à 100m, de façon à pouvoir effectuer les mesures à l'intérieur du peuplement, afin d'éviter les effets de bord, et être accessibles (vérification à l'aide de carte IGN au 1:25000). Sur le terrain, le choix entre les parcelles candidates s'est fait en fonction de l'accessibilité et de l'état de la parcelle sur place (coupe récente, estimation de l'âge erronée,...). Au final, une parcelle par classe d'âge a été sélectionnée. Le site de Saumos fait exception : seuls 2 peuplements ont été échantillonnés en raison de l'absence de parcelle de peuplements juvéniles à proximité du piézomètre. Au total, 20 peuplements ont été inventoriés.

4.2.2.2 *Données d'inventaire forestier*

Une placette d'échantillonnage de 625 m² a été marquée à l'intérieur du peuplement. Les données récoltées sont (Guillot et al., 2009b):

- Circonférence à 1.30 m ("Circumference at Breast Height ", CBH) de tous les arbres de la placette,
- Composition du sous-bois,

Sur chaque placette, une carotte est prélevée à la base d'un des arbres afin de faire une estimation de l'âge. La conformation de l'arbre est l'unique critère pris en compte dans ce choix (arbre ne présentant pas ou peu de bois de compression ; Bert, 2006 ; Polge et Illy, 1967). En faisant l'hypothèse que les peuplements sont équiens, une seule carotte suffit pour estimer l'âge de la parcelle.

Tableau IV-2 : Moyennes mensuelles des données de température et de pluviométrie aux points de la grille SAFRAN correspondant aux sept sites étudiés. Les caractéristiques géographiques et topographiques correspondent aux valeurs du centre de la maille SAFRAN.

Piézomètre		Le Temple et Saumos	Biganos	Mios	Saucats	Belin-Beliet	Escources
Numéro maille (maillage France)		7248	7498	7580	7583	7746	8084
X Lambert II étendu		340000	340000	340000	364000	356000	332000
Y Lambert II étendu		1993000	1969000	1961000	1961000	1945000	1913000
Altitude		38	28	17	66	57	61
Température moyenne mensuelle sur la période 1958- 2008	Aout	19.41	19.66	19.73	19.42	19.48	19.58
	Septembre	16.96	16.93	16.99	16.74	16.78	16.93
	Octobre	13.49	13.25	13.30	13.06	13.11	13.17
	Novembre	8.95	8.61	8.66	8.42	8.47	8.51
	Décembre	6.71	6.24	6.28	6.06	6.09	6.15
	Janvier	6.18	5.69	5.73	5.51	5.54	5.61
	Février	6.93	6.69	6.73	6.50	6.54	6.60
	Mars	9.01	8.95	9.03	8.73	8.78	8.90
	Avril	11.30	11.38	11.46	11.13	11.19	11.25
	Mai	14.91	15.14	15.21	14.89	14.94	15.03
	Juin	17.92	18.22	18.30	17.93	18.00	18.04
	Juillet	19.80	20.08	20.16	19.83	19.88	19.97
Précipitations moyennes mensuelles sur la période 1958- 2008	Aout	62.04	65.38	65.06	66.67	66.30	75.07
	Septembre	83.07	80.20	79.74	81.56	81.29	90.03
	Octobre	102.28	91.00	90.54	92.61	92.22	113.07
	Novembre	109.72	98.89	98.38	100.70	100.19	119.98
	Décembre	113.91	103.97	103.48	105.73	105.33	120.27
	Janvier	99.39	91.01	90.52	92.62	92.30	105.04
	Février	80.70	79.20	78.81	80.56	80.23	92.43
	Mars	71.67	72.95	72.50	74.29	73.94	86.20
	Avril	72.81	75.11	74.67	76.44	76.11	86.04
	Mai	71.79	76.77	76.36	78.20	77.95	83.02
	Juin	53.96	59.77	59.44	60.94	60.63	67.62
	Juillet	51.54	52.15	51.83	53.12	52.87	57.62

4.2.2.3 Données dendrochronologiques

Six carottes ont été prélevées sur 6 arbres (une par arbre), par site, à 1.30m du sol. Pour caractériser les effets du climat sur la croissance, les effets de compétition entre arbres doivent être limités (Fritts, 1976, Schweingruber, 1990) : seuls les arbres dominants, identifiés à partir des mesures de CBH de l'inventaire, ont été échantillonnés. Un total de 120 carottes pour la mesure de la croissance a été prélevé.

L'analyse des cernes a été réalisée au laboratoire, après planage et numérisation à une résolution de 1600 dpi. La mesure des cernes annuels de croissance a été réalisée à l'aide du logiciel Windendro 2003 (Regent Instruments, Québec, Canada) qui permet l'analyse semi-automatique de l'image des cernes d'arbres, avec une précision de 0.01 mm (Fernández de Uña, 2009b). Le fichier, résultant du traitement par Windendro, donne la largeur des cernes (*LC*, en millimètres). Le logiciel fournit aussi la largeur du bois final, par analyse automatique des couleurs de l'image. Cette mesure est peu fiable si elle n'est pas revalidée par l'opérateur. Elle ne sera donc pas utilisée ici.

L'écorce, et donc le cerne de l'année, ayant été systématiquement préservée, sur chaque échantillon, les erreurs de datation ont été limitées par une lecture antichronologique. Un contrôle a été conduit visuellement par interdatation à partir d'une courbe de référence pour le Pin maritime, obtenue pour la région Sud-ouest (D. Bert, communication personnelle).

4.2.3 Données météorologiques

Les données SAFRAN (Quintana-Segui et al., 2008 ; Vidal et al., 2010) ont été utilisées pour caractériser les conditions météorologiques sur chaque site. Les données de la maille SAFRAN la plus proche du piézomètre (grille de 8*8km) ont été extraites pour chaque site. Dans le cas des piézomètres situés près de Saumos et de Le Temple, villes proches géographiquement, un même point SAFRAN a été retenu. Le Tableau IV-2 donne les moyennes mensuelles sur la période durant laquelle les données météorologiques étaient disponibles et utilisables (1958-2008) pour la pluviométrie et la température. Les températures sont peu variables du Nord au Sud et de l'Ouest à l'Est. Les sites du Temple/Saumos et d'Escources ont des températures un peu plus élevées que les autres sites (environ 1°C en moyenne). En revanche, pour la pluviométrie mensuelle moyenne, les différences constatées peuvent aller jusqu'à plus de 20 mm (octobre). Les pluies les plus abondantes sont rencontrées au niveau du piézomètre d'Escource, les régions du sud et du littoral atlantique étant en général plus arrosées (Choisnel, 1987). Les pluies les moins abondantes se trouvent au nord ou en bordure du bassin d'Arcachon (Le Temple, Saumos, Mios).

4.2.4 Analyse des données

Deux jeux de données résultent de la campagne de terrain. Le premier jeu, issu de l'inventaire terrain, est utile pour caractériser les parcelles (âge moyen et type de sous-bois) et pour le calcul de la biomasse. Le second jeu de données dendrochronologiques sert pour la mesure des variations interannuelles de la croissance. L'ensemble des traitements mathématiques a été réalisé à l'aide du logiciel statistique R (R Development Core Team, 2010).

4.2.4.1 Etude des types de landes

Dans les landes, le type de station forestière peut être identifié en fonction du sous-bois (Augusto, 2006 ; Porté, 2009). Les données de l'inventaire du sous-bois ont été étudiées à l'aide de l'outil OrdiClust disponible dans la librairie "ade4TkGUI" sous R (Thioulouse et Dray, 2009). Douze espèces ont été notées : l'Ajonc d'Europe (*Ulex europaeus*, acidiphile, mésophile à hygrophile), l'Ajonc nain (*Ulex minor*, hygrophile), la Bourdaine (*Frangula alnus*, mésoxérophile à mésophile), la Brande (*Erica scoparia*, mésophile), la Callune (*Calluna vulgaris*, mésoxérophile, acidiphile), le Chêne pédonculé (*Quercus robur*, mésophile à hygrophile), le Chêne tauzin (*Quercus pyrenaica*, acidiphile, xérophile-mésophile), la Fougère aigle (*Pteridium aquilinum*, acidiphile, mésophile), l'Hélianthème (*Helianthemum nummularium*, xérophile), la Molinie (*Molinia caerulea*, acidiphile, hygrophile), le Phytolacca (*Phytolacca americana*, pionnière), le Pin maritime (*Pinus pinaster*, re-semis naturels, pionnière) et le Robinier (*Robinia pseudoacacia*, pionnière). Les mousses, les Bruyères (*Erica tetralix* et *Erica cinerea* confondues) et les herbacées (autres que Molinie) ont été annotées sans distinction d'espèce.

Seule la notation de "présence/absence" a été utilisée pour la classification ascendante hiérarchique, afin de savoir si les caractéristiques hydrologiques des stations forestières inventoriées se distinguent par la composition du sous-bois.

4.2.4.2 Biomasse

Les données de circonférences (CBH) ont été transformées en diamètre à hauteur de poitrine DBH (Diameter at Breast Height) à l'aide de la formule du cercle ($DBH = CBH / \pi$). A l'aide des relations allométriques établies par Shaiek (2011) pour le Pin maritime, la biomasse pour les parties aériennes a été estimée. Les relations liant ces variables sont de la forme :

$$W = a * DBH^b * Age^c \quad (Eq. 4.1)$$

avec W la biomasse sèche en kg et le DBH en m. Le Tableau IV-3 résume les différents coefficients a et b utilisés en fonction des compartiments calculés.

Tableau IV-3 : Paramètres des équations allométriques utilisés pour le Pin maritime (Shaiek, 2011). L'effet âge permet de prendre en compte dans l'équation un terme additionnel lié à l'âge (facteur c).

	a (kg.arbre ⁻¹)	b	c
Biomasse des aiguilles, sans effet âge	142 33	1.65 0.11	
Biomasse des aiguilles, avec effet âge	1916 428	2.07 0.09	-0.67 0.05
Biomasse du bois du tronc	4846 303	2.82 0.04	
Biomasse totale aérienne	5013 202	2.48 0.03	

Pour chaque arbre mesuré, la quantité de biomasse du tronc et du bois du tronc (i.e. sans écorce), la biomasse des branches, la biomasse des aiguilles (avec ou sans effet âge), et la biomasse totale est calculée.

L'indice de surface foliaire (LAI, *Leaf Area Index*, en m².m⁻²) est calculé selon la formule suivante :

$$LAI = \frac{W}{\frac{SLA}{2}} \quad (Eq. 4.2)$$

avec W , la biomasse des aiguilles (en kg) et SLA la surface spécifique foliaire (*Specific Leaf Area*, en m².kg⁻¹). La valeur de SLA retenue pour le Pin maritime est de 7.03 m².kg⁻¹ (moyenne des 3 cohortes d'un peuplement de 26 ans ; Porté et al., 2000). Elle est divisée par un facteur 2 en raison de la forme semi-cylindrique des aiguilles.

La biomasse racinaire est estimée à 20% de la biomasse aérienne totale (Bert and Danjon, 2006). Enfin, le stock de carbone de la parcelle est calculé en considérant que le carbone représente 50% de la biomasse totale, i.e. aérienne et racinaire, selon les recommandations du GIEC¹⁹ (Meredieu et al., 2005). Les valeurs moyennes de biomasse de chaque compartiment ont été calculées pour les 28 parcelles.

Etant donné que l'information sur la biomasse n'est disponible que pour l'année 2008, et pour comparer les différents sites sur la même base, les statistiques pour la profondeur de nappe (moyenne et écart-type) ont été calculées pour la période durant laquelle le peuplement le plus jeune était en place (e.g. si le peuplement a 10 ans en 2008, la moyenne est calculée pour la période 1998-2008).

4.2.4.3 Croissance

Deux méthodes peuvent être utilisées en dendrochronologie selon les objectifs qui sont définis au départ. Si l'analyse porte sur les facteurs environnementaux, i.e. le climat et/ou la

¹⁹ Groupe Intergouvernemental d'Experts sur du Climat

disponibilité en eau du sol présent et passé, il s'agit de dendroclimatologie : l'analyse se fait par inter-comparaison des 7 sites échantillonnés. Si l'analyse porte sur l'influence du milieu local sur la croissance, il s'agit de dendroécologie, et dans ce cas, l'échantillonnage doit être stratifié selon un facteur (Bert, 2006). Dans le cas présent, ce sont les catégories de profondeur de nappe, i.e. les types de landes.

4.2.4.3.1 Statistiques descriptives générales

Les statistiques descriptives des chronologies des 7 sites sont calculées à partir des largeurs de cernes (LC , mm) : Incrément de surface terrière moyen (IST), écart-type de l' IST (SD), Sensibilité moyenne (MS), et l'autocorrélation, comme suit :

(1) L'incrément de surface terrière moyen (aussi appelé *Basal Area Index*) est calculé selon la formule :

$$IST_N = \pi * \left(\sum_{n=1}^N LC_n \right)^2 - IST_{N-1} \quad (Eq. 4.3)$$

où la surface de l'année N dépend de la somme des largeurs de cernes précédents moins la surface de l'année $n-1$.

(2) La MS décrit la variabilité relative entre deux cernes adjacents et décrit la sensibilité aux changements à court-terme ou aux variations à haute-fréquence du climat (Fritts, 1971). Elle se calcule selon la formule (Rolland, 1993) :

$$MS = \frac{2}{N-1} * \sum_{i=1}^{i=N} \frac{|LC_{i+1} - LC_i|}{LC_{i+1} + LC_i} \quad (Eq. 4.4)$$

avec N , le nombre de cernes, et LC_i , la largeur du cerne en mm de l'année i .

(3) L'autocorrélation indique la présence ou l'absence d'arrière effets des années précédentes. Elle se calcule selon la formule (Venables et Ripley, 1993 ; R Development Core Team, 2010) :

$$R_k = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n-k} (LC_i - \overline{LC}) * (LC_{i-k} - \overline{LC}) \quad (Eq. 4.5)$$

avec k , l'ordre de l'autocorrélation, $\overline{LC}$, la valeur moyenne des largeurs de cernes, et LC_i , la largeur du cerne en mm de l'année i .

4.2.4.3.2 Analyse par site

Pour l'étude dendroclimatique, une fonction (exponentielle négative ou droite) a été ajustée sur la chronique LC de chaque arbre, afin de normaliser les LC et retirer l'effet âge, selon la méthode décrite par Fritts et al. (1969) :

$$LC = a * \exp(-b * Année), a > 0 \text{ et } b > 0 \quad \text{SINON} \quad LC = a * Année + b \quad (Eq. 4.6)$$

Les valeurs de LC normalisées, Ic , sont obtenues en divisant les valeurs observées par les valeurs prédites par le modèle. Si la régression n'est pas significative (p-value des coefficients de la régression), la carotte est exclue car on suppose que les tendances individuelles de croissance ne seront pas complètement exclues du jeu de données final. C'est le cas pour 5 échantillons à Saucats (2 arbres du peuplement d'âge pré-mature et 3 arbres du peuplement juvénile), 3 échantillons à Saumos (peuplement d'âge pré-mature), 1 échantillon à Mios (peuplement juvénile), 5 échantillons au Temple (peuplement juvénile), 9 échantillons à Escource (3 arbres du peuplement pré-mature et tous les arbres du peuplement juvénile), 4 échantillons à Biganos (peuplement juvénile), et 7 échantillons à Belin-Beliet (1 arbre du peuplement pré-mature et tous les arbres du peuplement juvénile). Au final, 87 carottes ont été utilisées pour l'analyse. Le lissage par application d'une courbe Spline n'a pas été jugé nécessaire dans notre cas, étant donné la faible longueur des séries chronologiques utilisées. L'indice de croissance obtenu (Ic) a été ensuite moyenné par an et par site pour obtenir une chronologie moyenne par piézomètre.

L'analyse des relations entre Ic et les variables hydroclimatiques a été réalisée en calculant des corrélations de Pearson. Afin de ne pas donner trop de poids aux individus marginaux, une analyse par Bootstrap a été privilégiée (Guiot, 1991), sur 1000 itérations (Brookhouse et al., 2008).

Les corrélations ont porté sur les variables suivantes :

- (1) Température moyenne, minimale et maximale ;
- (2) Somme des Précipitations ;
- (3) Profondeur de nappe moyenne, minimale et maximale ;
- (4) ETP Thornthwaite (1948). Elle est calculée mensuellement selon la formule, puis moyennée selon la période étudiée :

$$ETP_{th} = 16 * \left[\frac{10 * t}{I} \right]^a * F \quad (Eq. 4.7)$$

avec :

t , la température moyenne mensuelle,

I , l'indice thermique annuel (somme des 12 indices mensuels : $I_j = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$ (Eq. 4.8)

a , variable dont la valeur est fonction de l'indice I :

$$I = 6.75 * 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 1.79 * 10^{-2} * I + 0.49 \quad (Eq. 4.9)$$

F , coefficient de correction fonction de la latitude et du mois (Voir table en Annexe A-1).

- (5) Bilan Hydrique, calculé selon la formule :

$$B_h = \text{Précipitations} - ETP_{th} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Chacune de ces variables est calculée à différents pas de temps :

(1) Mensuelle ;

(2) Saisonnière :

- automne (septembre, octobre, novembre),
- hiver (décembre, janvier, février),
- printemps (mars, avril, mai), et,
- été (juin, juillet, août) ;

(3) Période de la saison de végétation :

- courte (avril à août, observée pour des sites secs, David, 1974),
- longue (mars à octobre, observée pour des sites humides, Demounem, 1970) ;

(4) Annuelle :

- de janvier (n-1) à janvier (n),
- de septembre (n-1) à août (n) ;

(5) Pluri-annuelle :

- de septembre (n-1) à septembre (n), i.e. 13 mois,
- de août (n-1) à septembre (n), i.e. 14 mois,
- de juillet (n-1) à septembre (n), i.e. 15 mois.

4.2.4.3.3 Analyse par type de lande

Pour l'étude dendroécologique, une exponentielle négative a été ajustée sur l'ensemble du jeu de données. Une série d'indices standardisés a été ensuite obtenue pour chaque chronique (résidus par rapport au modèle exponentiel commun), puis une moyenne par type de site a été calculée : station humide, station mésophile, station sèche. L'analyse se fait par année climatique, et par âge, afin de mettre en évidence, si elles existent, les différences de croissance à un âge donné (méthode de regroupement par âge, "age-banding" ; Mitchell, 1967; Briffa et al., 2001 ; Hugues, 2002). Pour cette dernière, les chroniques *LC* sont donc reclassées en fonction de l'âge de la carotte. Si le carottage n'inclut pas le cœur, le nombre de cernes manqués est estimé à partir d'une dendrochronomire (Bert, communication personnelle). L'âge du premier cerne visible sur la carotte dépend de la distance au cœur divisée par la largeur moyenne des 5 cernes mesurés le plus près possible du cœur.

4.3 Résultats

4.3.1 Analyse des données piézométriques

Un seul des sept piézomètres étudiés montre une tendance au cours du temps (Tableau IV-4 et Figure IV-3). La tendance pour les piézomètres de Saumos et de Biganos est croissante, avec une augmentation du niveau de la nappe moyen de 17.01 cm par décade pour Saumos, et de 9.03 cm par décade pour Biganos, mais un R^2 de 0.01 correspond à une variance expliquée négligeable. A l'inverse, la tendance est fortement décroissante pour Saucats, avec une diminution du niveau de la nappe moyenne de 40.38 cm par décade.

4.3.2 Caractérisation des parcelles

Il s'agit ici de l'analyse des données spécifiques à l'inventaire terrain, donnant des informations générales sur la placette échantillonnée : âge moyen de la parcelle, densité, DHB moyen et type de sous-bois.

L'âge des peuplements échantillonnés est compris entre 7 ans et 57 ans. Les résultats de l'âge lu sur la carotte prélevée pour l'estimation de l'âge de la parcelle ont été comparés avec l'âge moyen obtenu à partir de la lecture des carottes prélevées à 1.30 m (Tableau IV-5). Dans ce dernier cas, il est d'usage d'ajouter 3 ans (Lemoine et Decourt, 1969) pour tenir compte de la disposition en cônes imbriqués des cernes dans le tronc de l'arbre (Fritts, 1971). La différence moyenne est de 2.43 ans, ce qui est très proche de l'incertitude sur l'âge des carottes prélevées à 1.30 m (plus ou moins 3 ans). Cependant, cette différence est égale à 12 ans pour la parcelle âgée du piézomètre Le Temple. L'hypothèse du peuplement équié est rejetée pour cette parcelle.

L'analyse des âges mesurés sur le terrain a permis la classification des parcelles en classes d'âges :

- peuplements juvéniles : âge inférieur à 10 ans. Le peuplement jeune du piézomètre de Mios a dû être reclassé dans la classe d'âge pré-mature (17 ans),
- peuplements matures : âge supérieur à 35 ans.
- peuplements pré-matures : âge compris entre 11 et 35 ans,

En raison des éclaircies pratiquées, la densité du peuplement diminue avec l'âge (Tableau IV-5). Il n'existe pas de relation visible entre densité et profondeur de nappe en fonction de la classe d'âge. Le DBH est plus faible pour un âge donné en lande sèche, pour les peuplements pré-matures et matures (Tableau IV-5 et Figure IV-4).

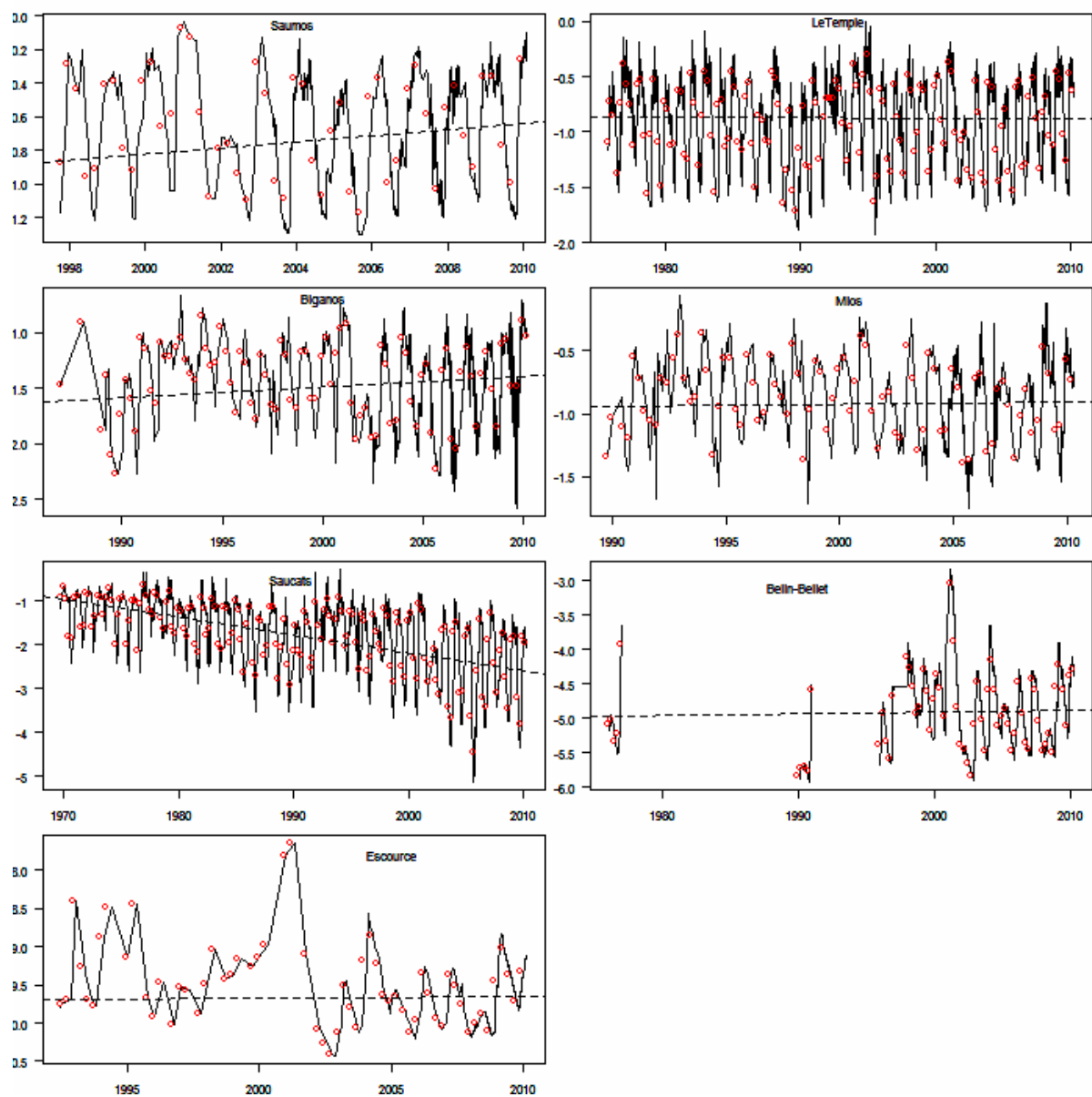


Figure IV-3 : Chroniques des piézomètres sélectionnés pour l'étude. Les points rouges correspondent aux moyennes saisonnières, la droite en pointillés correspond à la droite de régression calculée pour les chroniques piézométriques.

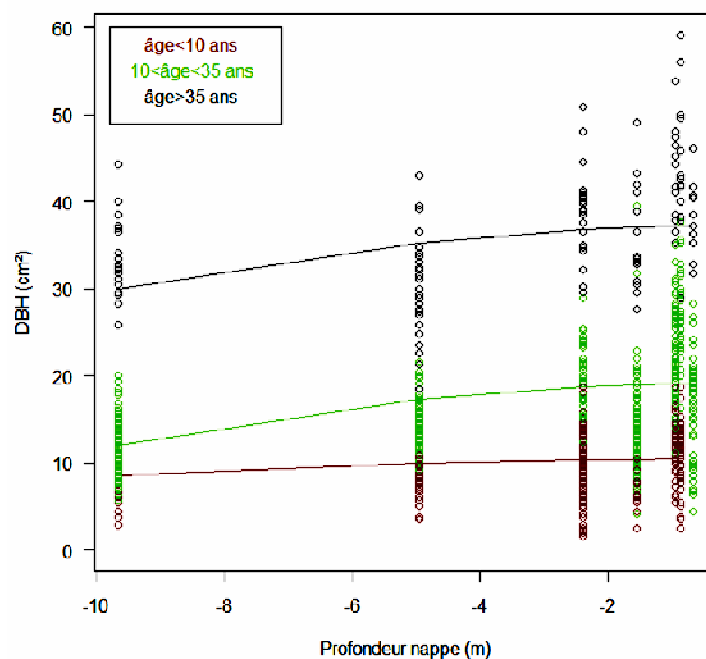


Figure IV-4 : Diamètre à 1.30 mètre des arbres échantillonnés sur tous les sites en fonction de la profondeur de nappe moyenne du site (calculée sur la période de croissance du peuplement le plus jeune) et par groupe d'âge.

L'ensemble des résultats de l'analyse de la classification ascendante hiérarchique des parcelles en fonction des données de l'inventaire du sous-bois sont visibles dans l'annexe A-1. Les valeurs des vecteurs propres sont : pour l'axe 1, 41.2 %, et pour l'axe 2, 33.6 %. En observant la distribution des espèces le long des axes, l'axe 1 explique le degré d'humidité de la station : Molinie et Fougère aigle à droite, mousses, bruyères, Hélianthème et Callune à gauche. L'axe 2 pourrait expliquer le degré d'acidification des sols de la station : Ajonc d'Europe, Fougère aigle et Chêne tauzin en haut. Les placettes se différencient en 3 groupes. Les ellipses des 3 nuages formés par ces groupes ne se recoupent pas, et ils peuvent être interprétés ainsi :

- groupe 3 : faible influence de l'axe 2, à gauche sur l'axe 1, correspondrait aux parcelles de lande humide et mésophile,
- groupe 2, faible influence de l'axe 1, en haut sur l'axe 2, peut correspondre à des parcelles où les sols sont acidifiés,
- groupe 1 : faible influence de l'axe 2, à droite sur l'axe 1, correspondrait aux parcelles de lande sèche.

Le pourcentage de la variance totale expliqué par les groupes (*Inertia Ratio*) est de 46 %. La correspondance entre les types de stations définies par Augusto et al. (2006) et les résultats de l'analyse par OrdiClust est indiquée dans le Tableau IV-5. Le groupe 1 se retrouve presque toujours dans la catégorie des landes sèches. Les landes humides et mésophiles ne se distinguent pas aussi bien, et sont réparties entre les groupes 2 et 3.

Tableau IV-4 : Résultats des régressions linéaires sur les chroniques piézométriques.

	R ²	F-statistique	Degrés de liberté	Somme des carrés		p-value	Significativité
				Totale	Résiduelle		
Saumos	0.01815	27.32	1478	2.594	140.295	1.97E-07	***
Le Temple	0.0004354	0.9963	2287	0.14	329.31	0.3183	
Biganos	0.008682	16.55	1890	2.387	272.508	4.93E-05	***
Mios	0.0003289	0.4632	1408	0.051	154.487	0.4962	
Saucats	0.2646	716.8	1992	480.88	1336.46	< 2.2e-16	***
Belin-Beliet	0.0006534	2.59	3961	0.9	1380.7	0.1076	
Escource	0.0001884	0.1692	898	0.029	151.465	0.6809	

Tableau IV-5 : Caractéristiques des peuplements échantillonnés et groupe.

		Code Parcelle	Age (carotte 0.1 m)	Age moyen (carottes 1.30 m)	Densité (tiges/ha)	DBH moyen (cm)	Type de lande (Augusto, 2010)	Groupe OrdiClust
Saumos	Mature	A_Smo	34	36	208	37.17	Humide	3
	Pré-mature	M_Smo	15		928	16.20	Humide	2
Le Temple	Mature	A_Tem	45	57	208	43.19	Humide	3
	Pré-mature	M_Tem	28		496	25.24	Humide	2
	Juvénile	J_Tem	10		1698	12.76	Humide	2
Mios	Mature	A_Mio	44	43	224	43.34	Humide	2
	Pré-mature	M_Mio	32		528	27.46	Humide	2
	Juvénile	J_Mio	17		624	22.34	Humide	2
Biganos	Mature	A_Big	46	45	240	36.24	Mesophile	2
	Pré-mature	M_Big	15		1472	14.64	Mesophile	2
	Juvénile	J_Big	8		1664	9.26	Mesophile	3
Saucats	Mature	A_Sca	46	46	329	38.76	Mesophile	3
	Pré-mature	M_Sca	19		687	20.24	Mesophile	3
	Juvénile	J_Sca	9		2280	9.85	Mesophile	3
Belin-Beliet	Mature	A_Bel	51	56	624	28.66	Sèche	1
	Pré-mature	M_Bel	18		944	15.04	Sèche	1
	Juvénile	J_Bel	7		992	8.76	Sèche	1
Escource	Mature	A_Esc	42	42	320	33.20	Sèche	2
	Pré-mature	M_Esc	13		1568	12.39	Sèche	1
	Juvénile	J_Esc	9		1472	8.71	Sèche	1

4.3.3 Effet de la hauteur de nappe sur la biomasse

La surface terrière des peuplements augmente avec l'âge (Figure IV-5 a). Elle est quasiment identique le long du gradient de profondeur de nappe pour les peuplements matures : bien que les DBH soient plus faibles au site d'Escource, la densité est importante, ce qui se traduit par une surface terrière équivalente aux sites de lande mésophile et humide.

La biomasse du bois du tronc (Figure IV-5 b), la biomasse aérienne (Figure IV-5 e) et le stock de carbone (Figure IV-5 f) augmentent avec l'âge des peuplements. Une tendance est visible entre la profondeur de nappe, i.e., le type de lande, et les données de biomasse ou de carbone, mais elle n'est pas statistiquement significative.

Les valeurs de LAI (Figure IV-5 c et d) obtenues pour les placettes sont dans la gamme des valeurs couramment obtenues pour cette espèce (entre 2 et 4 ; Guyon et al., 2003), mais les valeurs des barres d'erreurs calculées semblent discutables. Les valeurs de LAI, obtenues à partir du modèle allométrique biomasse des aiguilles avec effet âge, semblent plus fiables, car ce modèle rend compte du fait que, toutes choses étant égales par ailleurs, le LAI est plus important pour un peuplement juvénile. Cependant, ce modèle prédit un LAI plus faible chez les jeunes parcelles de lande sèche dans notre échantillon.

4.3.4 Surface terrière, Sensibilité et Autocorrélation pour le Pin maritime

Les largeurs de cerne (*LC*) ont été obtenues pour la période 1947-2008. Les données brutes sont visibles dans l'annexe A-3.

L'incrément en surface terrière est maximal pour les classes d'âge pré-mature ou juvénile pour tous les sites, sauf Biganos et Escources, pour lesquels l'incrément est le plus fort dans la classe d'âge âgée (Tableau IV-6). Les écart-types sont plus ou moins importants selon les sites. La sensibilité moyenne est à la limite du seuil de 0.3 : au dessous, les arbres sont considérés comme complaçants, c'est-à-dire qu'ils sont peu sensibles aux variations climatiques. Les peuplements juvéniles sont les plus sensibles aux effets du climat (Le Temple, Biganos, Saucats, Belin-Beliet et Escource). Pour le site d'Escource, les peuplements matures se révèlent eux aussi sensibles, contrairement à tous les autres sites âgés.

La Figure IV-6 montre l'autocorrélation moyenne pour les 20 premiers ordres. L'autocorrélation moyenne sur l'ensemble du jeu de données pour le premier ordre n'est pas négligeable. Elle devient non-significative à partir de l'ordre 2. Pour chacun des sites et des âges mesurés, l'autocorrélation du premier ordre est donnée dans le Tableau IV-6. Elle est toujours plus importante pour les peuplements matures, mais n'est pas négligeable pour les peuplements pré-matures des sites de lande humide (Saumos, Le Temple, Biganos). Pour le site de Mios, en lande mésophile, l'autocorrélation est aussi significative pour les peuplements juvéniles.

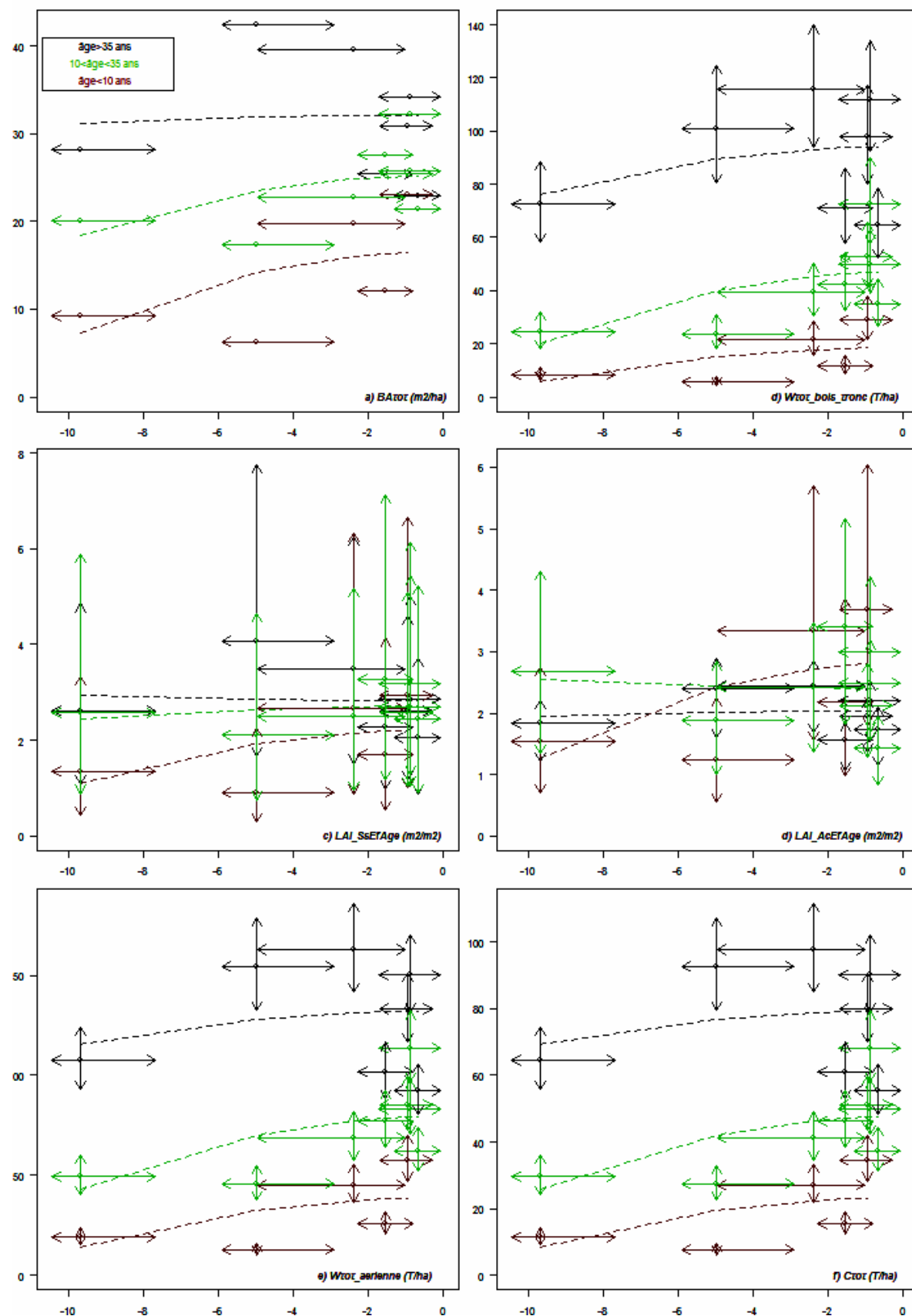


Figure IV-5 : Analyse par placette en fonction de la profondeur moyenne par rapport au sol de la nappe. Les flèches verticales correspondent à une fois l'écart-type pour la variable calculée et les flèches horizontales correspondent à la gamme de variation de la profondeur de nappe (minimum et maximum). Les régressions non linéaires obtenues par classe d'âge sont figurées, voir le tableau 2.6 pour leur significativité.

4.3.5 Effet des variables hydro-climatiques sur la croissance

Un exemple de processus de standardisation est donné pour le site de Biganos dans l'annexe A-4. La Figure IV-7 montre les indices I_c obtenus pour chaque site. Ces graphiques sont repris dans l'annexe A-5, avec le nombre d'observations ayant permis le calcul de l'indice I_c , et les variables climatiques d'intérêt fournies par la base de données SAFRAN.

Les chroniques d' I_c obtenues semblent être relativement sensibles aux variations climatiques (Figure IV-7). Les années à hiver froid sont marquées par un I_c faible pour tous les sites. De 1962 à 1965, les I_c sont faibles. Cette période inclut l'hiver 1962-1963, où les températures sont descendues jusqu'à -15°C à Bordeaux et qui fut, à l'époque, la période froide la plus longue depuis 1880. Une seconde période de 1985 à 1987 présente des valeurs de I_c décroissantes et faibles. Ces années correspondent aussi à une période froide : en janvier 1985, le gel a duré 16 jours, sans discontinuer, les minimales sont descendues à -16.4°C , et en 1987, les minimales ont atteint -15.8°C . Enfin, l'année 2008, pendant laquelle la température moyenne annuelle a été la plus froide depuis 1958, est aussi marquée par une diminution de l' I_c . Les années chaudes et sèches sont aussi synonymes de faible indice d' I_c . Ces indices sont bas pour tous les sites pour l'année 2003 (12 jours consécutifs où la température a dépassé 35°C). Pour les années 1989, 1990, 2002, 2005, marquées par une forte sécheresse, l' I_c est décroissant pour tous les sites (sauf Saumos en 2002). L'effet des années humides est moins évident. L' I_c augmente peu pour les années 1960 (sauf pour Belin-Beliet), 1965 et 1966. Il diminue en 1984, alors qu'en 1994, en 2000 et en 2007, l' I_c augmente.

L'étude des corrélations révèle que pour les sites en lande humide ou mésophile, la profondeur de la nappe est une variable explicative clef pour la compréhension de la variabilité de la croissance (Figure IV-8). En ce qui concerne les sites du Temple, de Biganos et de Saucats, c'est la principale variable hydroclimatique explicative. Sur les sites de Mios, Biganos et Saucats, la nappe est toujours corrélée positivement à la croissance. Les mois de début et de fin de saison de croissance semblent déterminants. Au Temple, la profondeur de la nappe aux mois de mars, mai et juin influence significativement et positivement la croissance, de même pour les mois de septembre et juillet à Saumos, et d'octobre à Mios. A Saumos, Le Temple et Belin-Beliet, la proximité de la nappe en hiver (en particulier les mois de février et décembre) est néfaste à la croissance (corrélation négative). A Biganos et à Saucats, les variables les plus intégratives (annuelles ou à cheval sur deux années) sont celles qui expliquent le mieux la variabilité de la croissance.

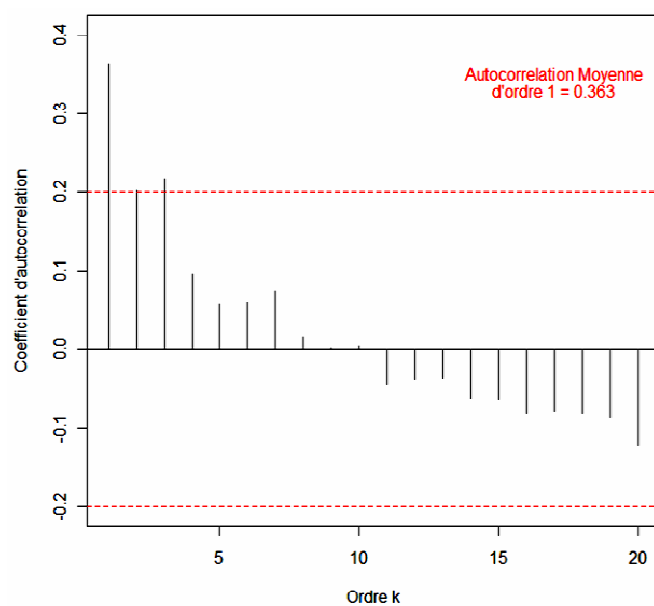


Figure IV-6 : Autocorrelation pour les 20 premiers ordres (décalage en années) : moyenne pour l'ensemble des chronologies de cernes étudiées.

Tableau IV-6 : Statistiques descriptives des chronologies de largeur de cernes par site et par classe d'âge.

		Année du premier cerne	Nombre de cernes	Incrément moyen en surface (cm ²)	Deviation standard (cm ²)	Sensibilité Moyenne	Autocorrélation d'ordre 1
Saumos	Mature	1976	32	29.96	9.77	0.21	0.64
	Pré-mature	1995	13	29.06	12.73	0.28	0.32
Le Temple	Mature	1947	61	21.81	9.63	0.21	0.76
	Pré-mature	1981	27	23.34	9.13	0.25	0.54
	Juvénile	2000	8	33.25	11.71	0.36	-0.02
Mios	Mature	1968	40	30.43	6.19	0.20	0.72
	Pré-mature	1980	28	32.74	11.30	0.20	0.41
	Juvénile	1992	16	34.32	10.69	0.19	0.42
Biganos	Mature	1965	43	27.15	8.94	0.20	0.57
	Pré-mature	1994	14	19.08	4.16	0.25	0.38
	Juvénile	1985	23	20.13	3.68	0.30	0.10
Saucats	Mature	1967	41	18.42	5.80	0.24	0.76
	Pré-mature	1989	19	28.83	7.73	0.28	0.20
	Juvénile	2000	8	18.95	5.34	0.39	0.07
Belin-Beliet	Mature	1946	62	9.18	2.67	0.24	0.71
	Pré-mature	1992	16	15.41	3.21	0.29	0.10
	Juvénile	2002	6	14.01	7.57	0.46	0.11
Escource	Mature	1967	41	19.28	7.80	0.32	0.53
	Pré-mature	1995	13	16.80	4.56	0.29	0.04
	Juvénile	2001	7	11.21	2.84	0.31	-0.10

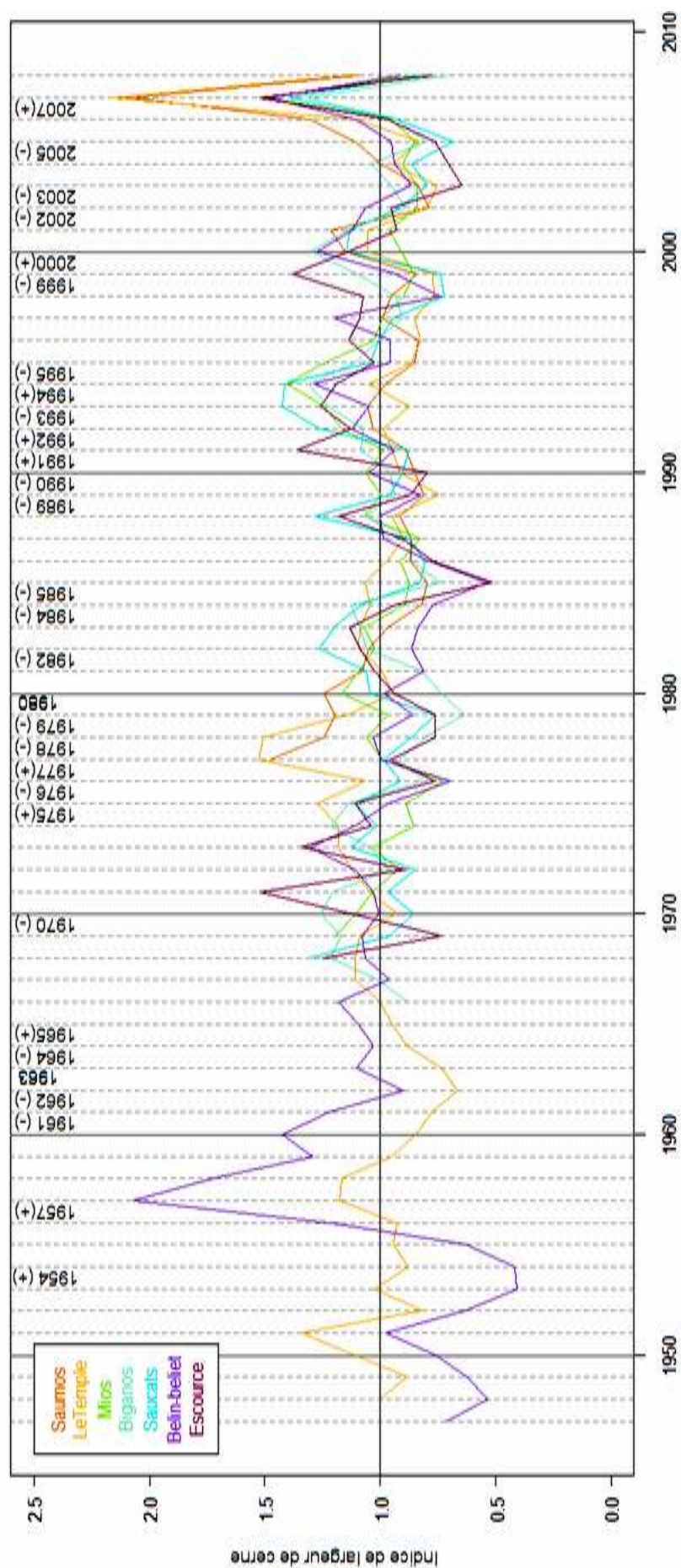


Figure IV-7 : Evolution de l'indice I_c pour chaque site entre 1947 et 2008.

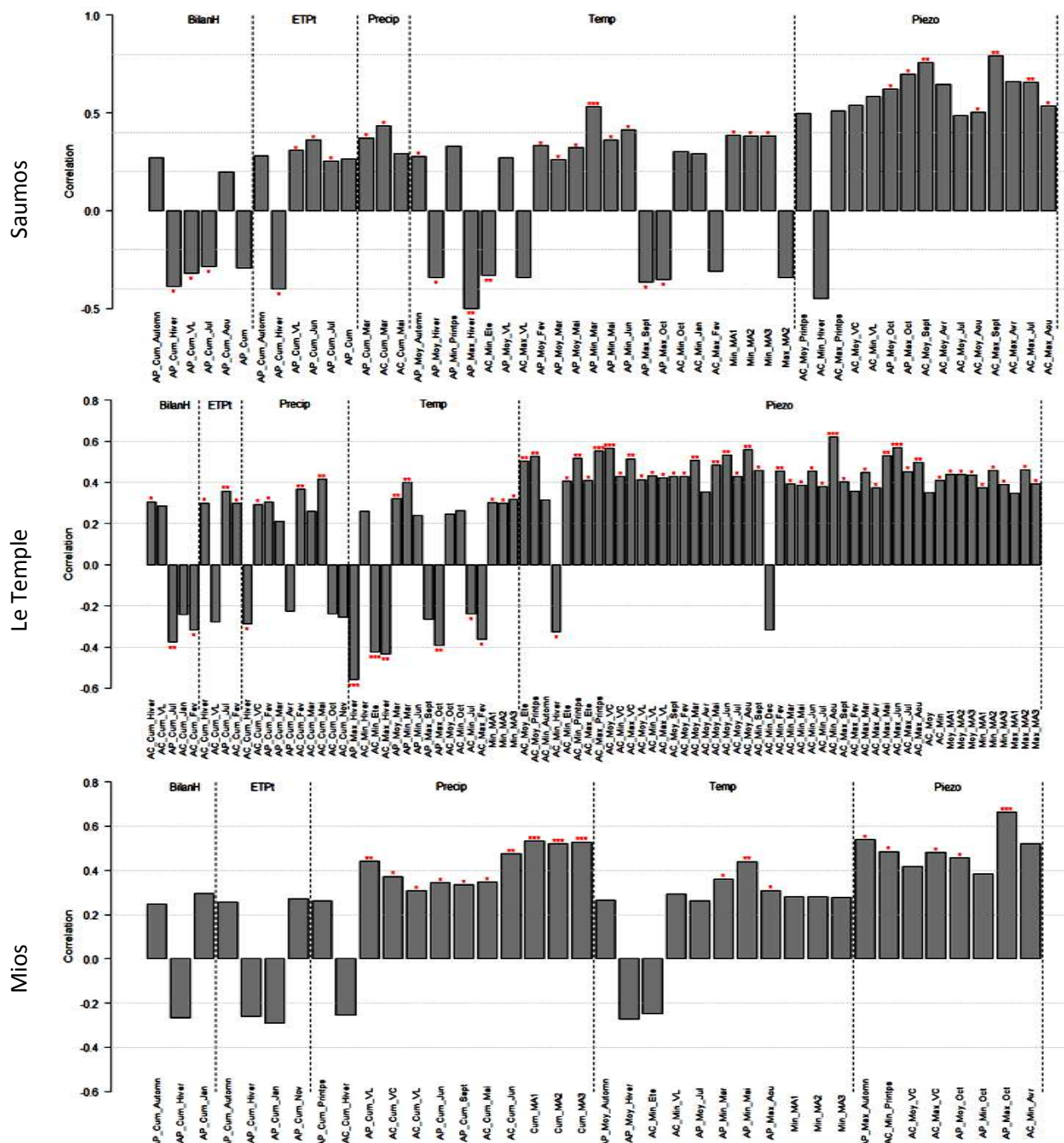
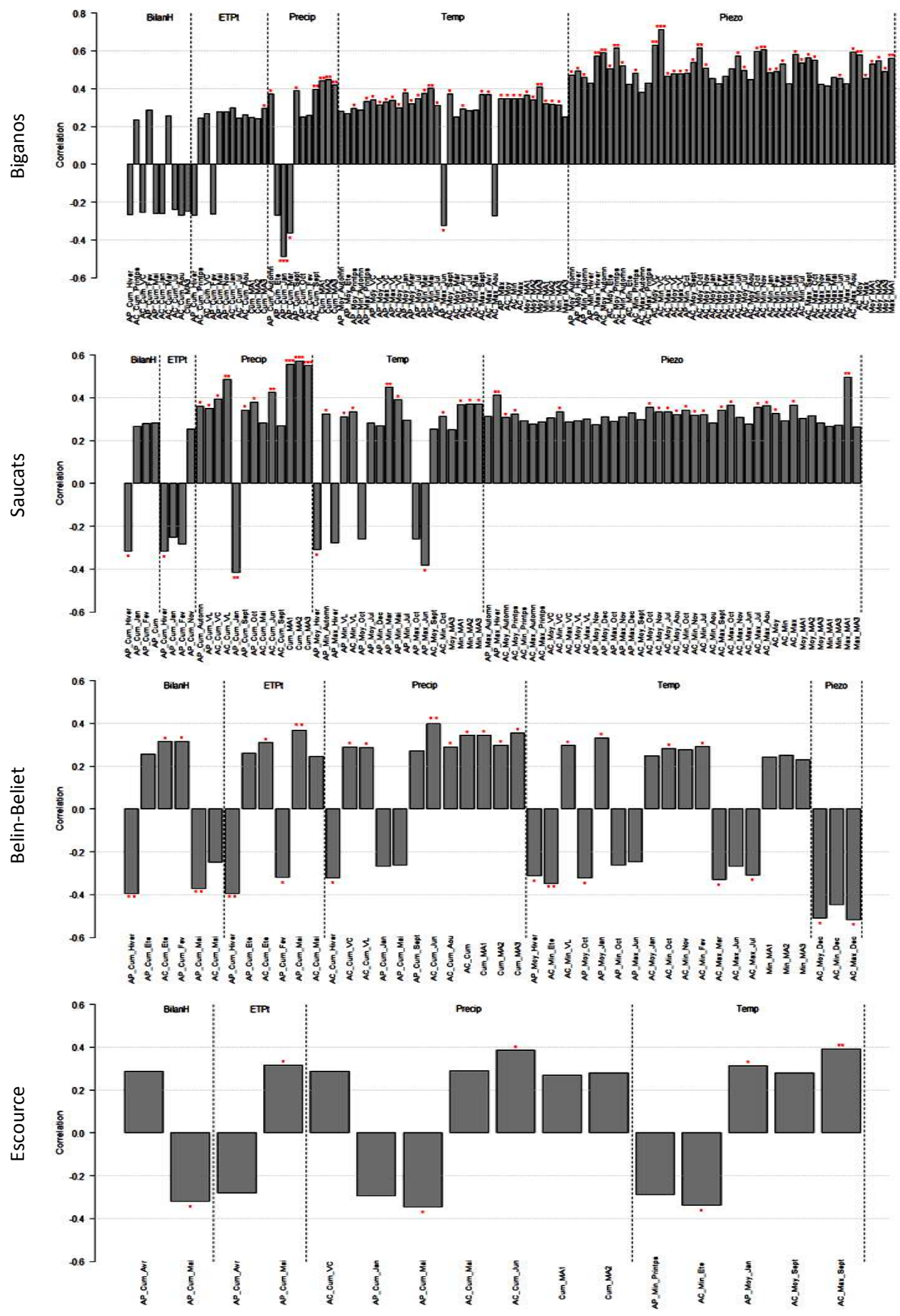


Figure IV-8 : Sensibilité des chronologies aux paramètres hydro-climatiques. Les coefficients sont donnés pour les corrélations r de Pearson calculées à partir du bootstrap. Seules les valeurs de corrélation dont la p -value<0.1 apparaissent sur le graphique. Codes de significativité : * $p<0.001$, ** $p<0.01$, * $p<0.05$.**

N.B : Les variables climatiques sont : "BilanH" pour le bilan hydrique, "ETPT" pour l'ETP de Thornthwaite, "Precip" pour les précipitations, "Temp" pour la température, et "Piezo" pour la piézométrie. Les codes en abscisse se lisent ainsi : "Cum", cumul ou "Moy", moyenne ou "Min" sur la période considérée, "Printps" ou "Ete" ou "Autumn" ou "Hiver", pour les variables saisonnières, "Jan" ou "Fev" ou "Mar" ou "Avr" ou "Mai" ou "Jun" ou "Jul" ou "Aou" ou "Sept" ou "Oct" ou "Nov" ou "dec" pour les variables mensuelles, "VL" ou "VC" pour les variables se rapportant à la saison végétative longue ou courte respectivement, "MA1" ou "MA2" ou "MA3" pour les variables calculées à cheval sur 2 années, août (n-1) à septembre (n), septembre (n-1) à septembre (n) et juillet (n-1) à septembre (n) respectivement, et " " pour les variables annuelle calendaires. Le sigle "AP" signifie année précédente et "AC", année courante.



La température n'a pas un effet très significatif et explicatif. Les corrélations négatives sont le plus souvent observées avec les températures hivernales. A Saumos, plus l'hiver est chaud, meilleure est la croissance. Inversement, plus l'été est froid, moins bonne est la croissance, avec une importance particulière pour les mois charnières tels que le mois de mars qui favorise la croissance lorsqu'il est doux. La situation est quasi identique au site du Temple, voisin. A Saucats, le mois de mars est aussi un mois déterminant. Tandis qu'à Mios, c'est la température du mois de mai qui semble avoir une influence prépondérante, avec une croissance négativement corrélée aux températures minimales.

Les corrélations avec les précipitations sont variables d'un site à l'autre. La pluviométrie explique peu les variations de croissance sur les sites de Saumos et du Temple. Lorsque les corrélations sont très significatives, ce sont souvent pour les pas de temps les plus longs, cumulant les pluies sur de longues périodes (annuelles ou à cheval sur 2 années), comme à Mios, à Biganos et à Saucats. Cependant, quelques mois semblent avoir une importance primordiale, le plus souvent autour de la saison de végétation. Au Temple, ce sont les cumuls de pluie des mois de février et mai qui sont positivement corrélés à la croissance. Le même effet est visible pour le mois de juin à Belin-Beliet. Mais les effets peuvent être inverses, avec une croissance défavorisée par les cumuls de pluie des mois de janvier pour Biganos, et Saucats, du mois d'octobre pour Le Temple.

ETPt et le bilan hydrique sont rarement des variables très explicatives, sauf pour le site de Belin-Beliet. Ce site semble donc plus sensible à une combinaison de facteurs plus qu'à un facteur unique.

En règle générale, les corrélations sont inférieures à 0.5, et elles sont rarement très significatives ($p < 0.001$). Une variable hydro-climatique seule n'explique donc pas toute la variabilité de la croissance.

Escource, dont la nappe est la plus profonde, se distingue des autres sites, car aucune des variables hydro-climatiques sélectionnées n'explique très significativement la croissance. Bien que les mois de début de saison de croissance (Avril, Mai, Juin) ressortent dans les corrélations les plus significatives, elles restent faibles et statistiquement peu fiables.

4.3.6 Variabilité de la croissance en fonction des types de landes

La courbe ayant permis la standardisation pour l'ensemble des chroniques en fonction de l'âge du cerne est visible en Figure IV-9. Les largeurs de cernes les plus faibles, à un âge donné, sont rencontrées pour les sites de lande sèche (violet), et les largeurs les plus importantes pour les landes humides (orange). L'ajustement est statistiquement très significatif ($p < 0.001$).

Les sites de lande humide et de lande mésophile ne sont pas significativement différents, mais la lande sèche se distingue de façon significative (test de Bonferroni, $p < 0.001$) des deux autres types de landes. Cette différence est surtout visible avant 50 ans

(Figure IV-10). Dans le plus jeune âge, jusqu'à 10 ans, l'accroissement le plus fort est observé en lande humide. Au stade pré-mature, les landes humides et les landes mésophiles présentent des accroissements similaires. En revanche, en lande sèche l'incrément est toujours plus faible, du plus jeune âge jusqu'à l'âge mature. Vers 40 ans, tous les types de landes se confondent.

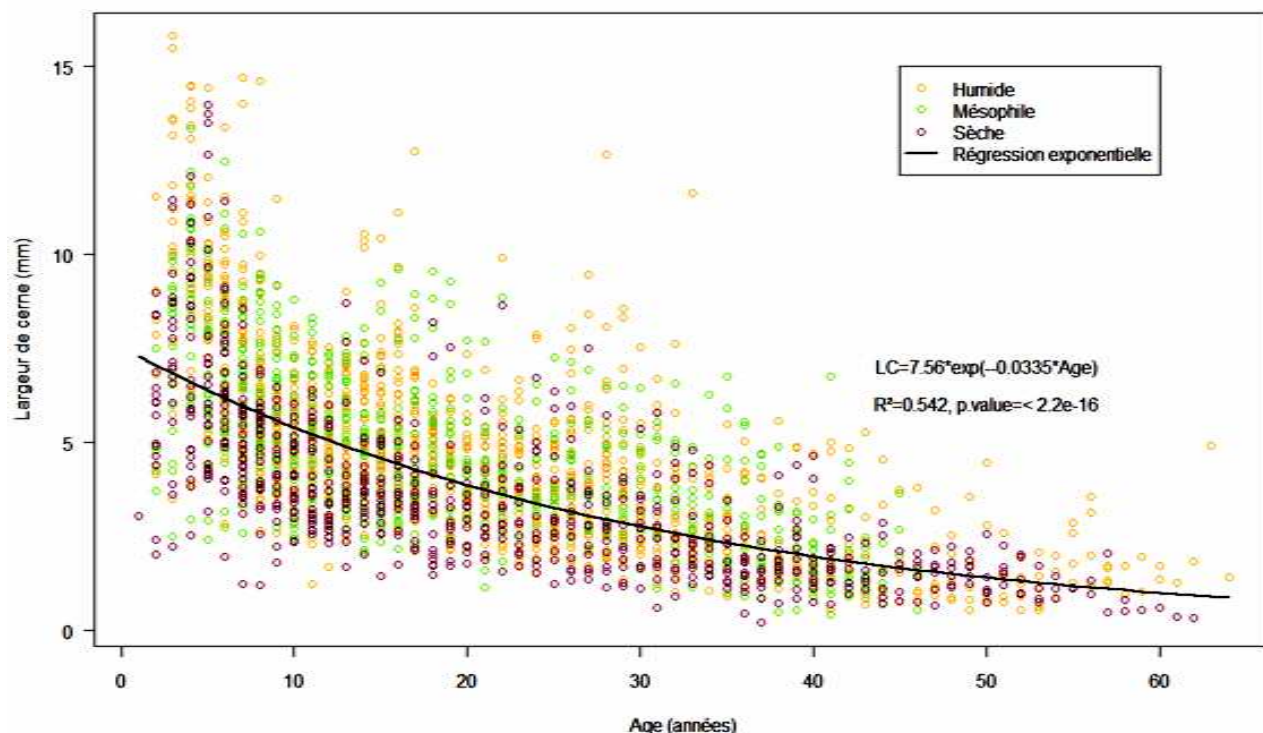
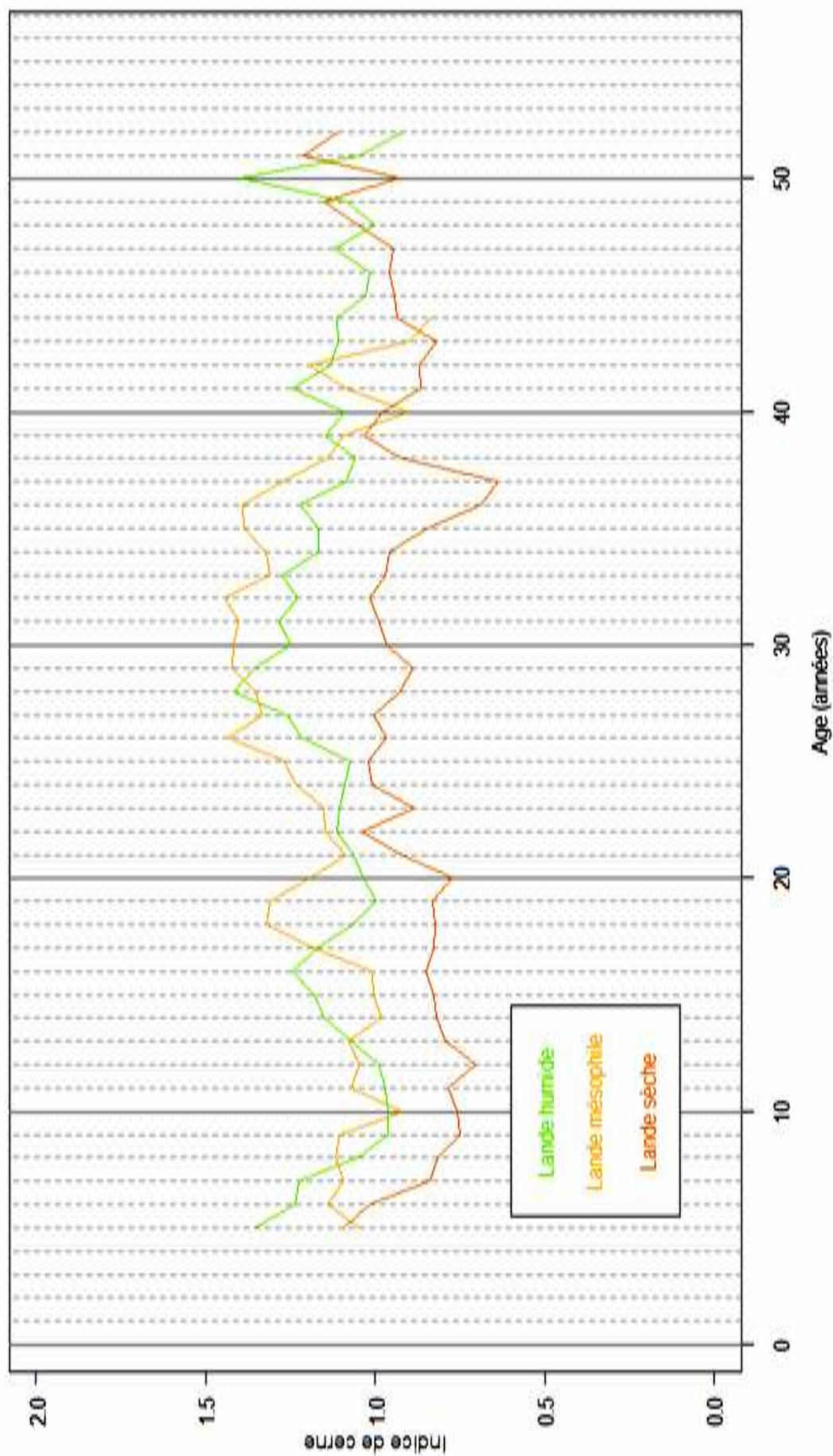


Figure IV-9 : Relation entre âge de l'arbre et largeur de cerne. Modèle exponentiel utilisé pour normaliser le jeu de données cerne.

Lorsque les moyennes par type de lande sont recalculées par regroupement annuel, i.e. en fonction de l'année calendaire, et non plus de l'âge, les années caractéristiques observées au paragraphe 2.3.4 (Figure IV-7) sont à nouveau visibles (Annexe A-6). Généralement, la croissance est meilleure en lande humide, qu'en lande mésophile. Les quelques années où la lande mésophile a un accroissement relatif plus important sont les années chaudes (en particulier les températures hivernales) durant lesquelles la pluviométrie est autour de la moyenne (environ 1000 mm), telles que 1975, 1982, 1994 et 2000 (voir l'annexe A-5 pour la chronoséquence des données climatiques SAFRAN). Les landes sèches ont quasiment toujours des accroissements relatifs inférieurs aux autres types de lande, mais certaines années particulièrement difficiles, l'écart devient très faible, en particulier entre lande sèche et lande mésophile, comme en 2005, année marquée par une pluviométrie très faible et un niveau de nappe en crue hivernale très bas. En revanche, ce type de lande semble avoir été plus sévèrement touché par la canicule de 2003 que les deux autres types de landes.

Figure IV-10 : : Evolution de l'indice Ic en fonction de l'âge pour les différents types de landes.



4.4 Discussion

Evolution décennale du régime phréatique

La tendance générale des chroniques piézométriques observée dans notre échantillon est en accord avec les observations du BRGM : il n'y a pas de diminution régionale du niveau moyen de la nappe Plio-quaternaire depuis les années 1970. Dans deux cas (Saumos et Biganos), une tendance faible, mais significative, d'accroissement de la hauteur de nappe a été observée. Il est cependant peu probable que cette tendance ait une influence notable sur la croissance puisque la modification à Saumos est de 0.017 m par décade, en regard de l'amplitude du battement de la nappe compris entre 0 et -1.3 m de profondeur, et de 0.09 m par décade pour Biganos, contre un battement de nappe compris entre -0.6 et -2.6 m. Au site de Saucats, la tendance est fortement décroissante. La situation y est un peu particulière car contrairement aux sites de Saumos et Biganos, les oscillations deviennent aussi plus importantes au cours du temps. La nappe oscillait entre -0.3 et -2.5 m en 1970, contre des oscillations comprises entre -1.5 et -5.1 m en 2000. La proximité et le nombre des parcelles agricoles autour de ce piézomètre, qui nous avaient obligés à agrandir la zone de prospection pour la recherche de parcelles candidates (voir paragraphe 2.2.2.1), expliquent ces modifications de comportement. En effet, les réseaux de drainages agricoles sont plus profonds que les fossés de drainage forestiers classiques (au minimum 1.4m contre 0.8 à 1.2m respectivement), et parfois accompagnés de drains enterrés (Chossat et Laplana, 1995), ce qui pourrait expliquer la diminution de la profondeur de la nappe en hiver (niveau en crue). La diminution du niveau de la nappe à l'étiage pourrait être liée au pompage destiné à l'irrigation. Cependant, sur des sites soumis à un prélèvement, des oscillations journalières fortes (parfois supérieures au mètre) sont visibles (voir chapitre II). Par ailleurs, les forages agricoles prélèvent préférentiellement dans la nappe plio-quaternaire (95% en Gironde ; SAGE, 2005), mais peuvent aussi utiliser la nappe miocène qui se trouve juste en dessous. Il se pourrait qu'un phénomène de drainance verticale entre en action, par dépression de la nappe sous-jacente. Mais il est impossible de vérifier cette hypothèse, car les forages agricoles en nappes profondes (soumis à une autorisation de la Chambre d'Agriculture) ne sont pas encore intégrés à la base de données du BRGM (SAGE, 1999).

Il faut souligner ici que de tels changements de profondeur et d'amplitude des oscillations de la nappe peuvent avoir des impacts négatifs sur la productivité forestière. En effet, aucun élément ne permet de penser que le système racinaire des peuplements peut s'adapter à de tels changements. Ils ne sont pas souhaitables car ils peuvent remettre en cause le principe d'uniformité. Klingebiel et Billy (1997) attribuaient la disparition de la moitié des lagunes et zones humides répertoriées dans le périmètre du Parc Naturel Régional des Landes de Gascogne à une diminution du niveau régional de la nappe. Or, ce niveau n'a pas évolué entre 1980 et 2010. Des recherches sont actuellement en cours pour étudier l'impact

hydraulique de la généralisation de la pratique du drainage sur la circulation de l'eau en surface et dans la nappe²⁰.

Relation végétation-régime de la nappe phréatique

Depuis les travaux de Saint-Didier, Demounem ou Bergeret (années 70-80), la typologie de la végétation accompagnatrice des peuplements de pin est supposée refléter les conditions hydroclimatiques stationnelles avec typiquement, la Molinie en lande humide (nappe affleurant en hiver), la Fougère aigle en lande mésophile et l'Hélianthème et la Callune en lande sèche. Nos résultats sont plus nuancés et ne distinguent finalement que deux ensembles, la lande sèche et les deux autres types de landes regroupés ensemble. Les deux premiers axes de l'analyse en composante principale du sous bois expliquent bien la variabilité totale (Axe1 = 41.2%, Axe 2 = 33.6 %). Pour comparaison, Porté et al. (2009) obtenaient pour le même type d'étude sur le sous-bois des Landes de Gascogne 13.13 et 9.69%. Les résultats de notre étude semblent plus discriminants. Cela est principalement du au fait que notre jeu de données a sélectionné les extrêmes et favorise la différenciation des caractères du sous-bois. La variance totale expliquée par les groupes issus de la classification ascendante hiérarchique est excellente. Les deux sites de lande sèche se caractérisent bien par la composition de leur sous bois, alors que ce n'est pas le cas pour les peuplements de lande humide et mésophile.

Biomasse et dendrométrie des peuplements

La productivité moyenne du Pin maritime se différencie fortement en fonction du type de Lande (inventaires IFN, 1998, 2008). L'analyse en composante principale de la productivité de 65 peuplements publiée par Lemoine (1981) indique que l'axe principal s'identifie assez bien avec une échelle pédoclimatique (allant des peuplements de dunes aux peuplements de Lande sèche, mésophile et humide), sauf pour un peuplement sur les cinq de lande humide (expliqué par un excès d'eau en hiver) et pour deux peuplements sur les 8 de lande sèche, sans pouvoir fournir d'explication évidente. Compte tenu des éclaircies plus dynamiques en Lande humide et mésophile, les données de biomasse que nous avons estimées pour nos sites ne reflètent pas les différences de productivité entre lande sèche, mésophile et humide. Tout au plus, des tendances générales vers une plus faible biomasse sont observées pour les parcelles en landes sèches mais sans qu'aucune des relations soit statistiquement significative. La méthodologie de calcul de la biomasse grâce aux équations allométriques ne peut cependant pas être remise en cause. Lemoine (1969), Trichet et al. (2008) et Shaiek et al. (2011) ont en effet démontré que les paramètres de ces équations ne dépendaient pas des conditions stationnelles (fertilité, climat, régime hydrique). En revanche, la taille de notre échantillon est probablement insuffisante pour mettre en évidence un effet stationnel de façon

²⁰ A. Castro, Projet CRPF, en partenariat avec la Chambre d'Agriculture, déposé en 2008.

significative, ce qui suppose de pouvoir extraire les effets de la sylviculture et des perturbations.

Les tables de production du Pin maritime établies par Lemoine et Decourt (1969) intègrent l'âge, la hauteur dominante, la circonférence des arbres dominants, le nombre d'arbres par hectare, un indice de fertilité du site fonction de critères pédoclimatiques, le volume sur pied avant et après éclaircie, afin de déterminer l'itinéraire technique moyen optimum. Elles sont largement utilisées par la filière forestière dans la région des Landes de Gascogne. Une lecture par âge/circonférence de nos placettes dans cette table de production indique que les peuplements échantillonnés ici sont toujours sensiblement moins denses que le standard, sauf pour les sites de Belin-Beliet et de Saucats. L'inventaire ayant été réalisé en 2008, il ne faut pas exclure que cette différence de densité soit due au nettoyage des chablis de la tempête 1999 au sein d'un peuplement resté sur pied. Une lecture par âge/densité indique que les circonférences sont toujours légèrement plus importantes que celles des peuplements indiqués dans la table de production. Mais les tables sont assez anciennes, et les gains de productivité ont été importants depuis les années 60 suite aux améliorations techniques (la production courante à l'hectare a progressé de 32.3 % en moyenne pour les peuplements de 10 à 30 ans entre 1977 et 1998 ; IFN, 1998). De nouveau, les peuplements de Belin-Beliet et de Saucats se distinguent, car leur circonférence est inférieure à celle des tables. Ces deux peuplements paraissent donc avoir un mode de gestion moins intensive que les autres sites, avec des éclaircies moins fréquentes et des diamètres inférieurs.

Il semble donc que les placettes étudiées ici sont dans la gamme des peuplements de Pin maritime indiqués dans les tables de production de l'espèce, i.e. conformes aux standards de conduite.

Il est aussi difficile de quantifier la différence de productivité en fonction du type de lande, en raison de l'importance de l'effet sylvicultural (choix du propriétaire pour la conduite de sa parcelle). Traditionnellement, la régénération naturelle se pratique davantage en lande sèche (plus fortes densités chez les jeunes). En plantation, le type de lande n'influence pas le choix du nombre de plants installés à l'hectare. Puis, bien que la première éclaircie ait lieu plus tard en lande sèche, la densité est plus sévèrement réduite par la suite (J. Hazéra, Pro Silva, communication personnelle). Les 20 peuplements observés ici ne permettent pas d'observer des différences de conduite entre les différents types de lande : tous les peuplements juvéniles étaient installés en ligne (pas de régénération naturelle) et les peuplements de lande sèche n'ont pas toujours une densité plus faible pour un âge donné.

La différence entre lande humide et mésophile d'une part et lande sèche d'autre part est finalement la seule constante qui ressort de notre échantillon au travers de l'étude des DBH, de l'analyse du sous-bois et de l'étude de la biomasse des peuplements. Cependant, il aurait fallu échantillonner davantage de placettes en situation "intermédiaire", c'est-à-dire sur toute la gamme de profondeur de nappe, entre le site d'Escource (nappe à -10m de profondeur) et le site de Belin-Beliet (nappe à -3m de profondeur) d'une part et entre le site de Belin-Beliet et

les autres sites d'autre part, pour renforcer cette tendance. D'autres auteurs ont montré un optimum en lande mésophile (Loustau et al., 1999) ou en lande humide drainée (Chaperon et Crémière, 1994). Loustau et al. (1999) estiment les productions à $7.8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en lande humide, $10.0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ en lande mésophile, et à $8.0 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ pour la lande sèche et les dunes, en moyenne sur le massif pour l'année 1988, à partir des données de l'IFN.

Pour une classe d'âge donnée (en particulier les peuplements matures et pré-matures), nous confirmons que les peuplements semblent moins productifs le long du gradient de profondeur de nappe, mais les régressions n'étant pas significatives et au vu du faible nombre de point, il est à nouveau difficile de conclure quant à la significativité des écarts entre les pentes des droites en fonction de l'âge.

Analyse dendroécologique des sites échantillonnés

L'effet de l'âge sur la croissance secondaire du pin maritime est bien connu (Lemoine, 1991 ; Delzon, 2005 ; l'IFN, 1998). Il est bien visible sur les données brutes de largeur de cerne *LC*. Il est donc primordial de corriger les effets de l'âge par le calcul de l'indice *Ic*. La croissance secondaire, rendue indépendante de l'âge tel que nous l'avons quantifiée par l'indice *Ic* se révèle assez sensible aux variations annuelles du climat : les années caractéristiques se retrouvent bien dans le signal *Ic* des 7 sites. Les sites les plus sensibles (au sens de Fritts et al., 1969) sont les jeunes peuplements et les peuplements de lande sèche : leur croissance doit être plus marquée par les effets du climat. A contrario, les arrières effets des conditions des années précédentes sont davantage marqués pour les peuplements matures (auto corrélation d'ordre 1 plus forte), quelque soit le site.

Notre étude dendroécologique est la première à mettre en évidence l'importance du régime de la nappe sur la croissance du Pin maritime à l'échelle régionale. Ceci peut sembler surprenant car un tel effet est présumé de longue date mais sans qu'une quantification précise entre les variations temporelles de la nappe et la croissance ait pu encore être réalisée, principalement par manque de données piézométriques et faute d'une métrique de croissance appropriée. L'indice utilisé ici est sans doute incomplet, ne prenant pas en compte les effets de densité, et notre échantillon, pourtant à la limite maximale de ce qu'il était possible matériellement, est de taille réduite. Néanmoins, les corrélations que nous mettons en évidence nous semblent suffisamment robustes pour conserver une portée générale.

L'étude des corrélations montre que ce lien entre la croissance et les variables hydro-climatiques n'est cependant pas trivial. En règle générale, la croissance est corrélée positivement avec la profondeur de la nappe. Pour les deux sites de lande mésophile (Biganos et Saucats), c'est la principale variable explicative. Sur ces deux sites, ce sont les variables les plus intégratives temporellement (statistique annuelles ou sur deux années) qui expliquent le mieux la croissance. Pour ces sites, la croissance semble dépendre de la succession, de conditions particulières, plus que des conditions à un instant donné. Pour deux sites de lande

humide (Saumos et Le Temple), la proximité de la nappe en hiver est néfaste pour la croissance de la même année. Cet effet était relativement attendu (Loustau et al., 1999). Pour les deux sites de lande sèche, Belin-Beliet et Escource, la quasi-absence de relations entre les variables piézométriques et la croissance est remarquable et s'explique assez simplement. La nappe est fonctionnellement hors d'atteinte de leurs racines. Le système racinaire du Pin maritime est constitué d'un pivot central large, de plusieurs racines horizontales en surface et à des profondeurs intermédiaires, ainsi que d'un large nombre de ramifications secondaires verticales issues des racines secondaires latérales (Danjon et al., 1999 ; Dupuy et al., 2005). Quelques études se sont intéressées aux différences d'enracinement entre lande sèche et lande humide pour le Pin maritime dans les Landes (Bakker et al., 2006 ; Cucchi et al., 2007 ; Achat et al., 2008). Des tranchées ont été réalisées jusqu'à 1.8m sur les sites de lande sèche (Achat et al., 2008), et des racines fines ont été observées jusqu'en bas du profil. Les auteurs font l'hypothèse que les racines peuvent explorer jusqu'à 2.5 à 3 m de profondeur de sol. Cette profondeur est encore inférieure à la limite supérieure de la nappe à Belin-Beliet (nappe oscillant entre 2.8 et 5.9 m de profondeur) et Escource (7.7 à 10.4 m de profondeur).

La température n'est pas une variable très explicative bien que des corrélations négatives soient observées avec les mois hivernaux. Des effets négatifs ont été observés sur les chroniques I_c , pour les années où les températures hivernales sont descendues exceptionnellement bas (1962-1963, 1985 et 1987). En effet, les froids hivernaux ont une action par effet seuil : ils n'affectent la croissance que s'ils sont très marqués.

L'effet des précipitations sur la croissance semble primordiale pour les mois de début et de fin de saison de végétation, où les pluies sont abondantes et conditionnent la précocité et la durée de déficit estival (observé sur des enregistrements de croissance radiale ; Devaux, 2010 ; Moreaux et al., 2011). On aurait pu attendre des corrélations plus significative pour les mois d'été durant lesquels le déficit hydrique est parfois important (Loustau et al., 1999) et où les précipitations peuvent représenter une ressource non négligeable pour la croissance. Mais ces précipitations sont de toute façon faibles en moyenne et leurs variations interannuelles sans effet majeur sur les différences de croissance interannuelles. Pour deux sites de lande humide (Saumos et Le Temple), la hauteur des précipitations est moins significative que les autres variables hydroclimatiques. Ces peuplements pourraient être moins dépendants des précipitations s'ils ont accès à la nappe phréatique. Cette hypothèse est cohérente avec Trichet et al. (2008) qui mesurent un gain de biomasse peu affecté lors d'années où le déficit hydrique est fort en été, sur un peuplement de Pin maritime avec une nappe oscillant entre 0.1 et 1.4 m. De surcroît, la différence de réserve utile du sol rend la croissance moins dépendante des pluies d'été en lande humide (Loustau et al., 1999) où les sols, plus riches en matière organique, ont une capacité de réserve en eau couvrant 15 à 20 jours des besoins en eau de la végétation, contre 8 à 10 jours en lande sèche.

Lorsque les données sont regroupées par type de lande et non plus par site, les tendances observées pour la biomasse sont à nouveau visibles. En effet, les peuplements de

lande mésophile et de lande humide ne se distinguent pas du point de vue de leur croissance en fonction de l'âge, tandis que les peuplements de lande sèche sont statistiquement et significativement différents des deux autres. Ces données permettent de mettre en lumière une croissance nettement inférieure dans les jeunes années aux sites de lande sèche et qui augmente assez faiblement dans le temps. Ce qui valide l'hypothèse selon laquelle les peuplements de lande sèche souffrent d'un stress permanent, qui limite leur croissance quelque soit les variations climatiques.

Cas des peuplements en lande sèche

A ce titre, le site d'Escource se distingue nettement de tous les autres sites, il est difficile de comprendre lequel des paramètres hydroclimatiques explique le mieux sa croissance, au vu du faible nombre et de la faible significativité des corrélations qui ressortent de l'analyse du jeu de données. Sur ce site, l'incrément moyen en surface terrière est parmi les plus faibles observés et parmi les moins variables avec le site de Belin-Beliet. Devaux (2010) a comparé le fonctionnement d'un site de lande sèche équivalent au site d'Escource (Vielle-Soubiran, où la nappe est à plus de 7 m de profondeur) et un site de lande humide (Le Bray, où la nappe est toujours superficielle, à moins de 1.8 m de profondeur). De façon surprenante, le peuplement de lande sèche ne montre pas de stress hydrique ni de fermeture stomatique lors d'un épisode de sécheresse estivale important, alors qu'au même moment le site de lande humide accuse un stress important, bien que la disponibilité de l'eau dans le sol y soit plus importante. L'explication la plus probable est une adaptation profonde des peuplements de lande sèche aux conditions difficiles, via l'adaptation de leur système racinaire et de leur surface foliaire. Bakker et al. (2006) ont observé un plus grand nombre de racines fines, et des racines plus longues sur les sites secs par rapport aux sites humides. De plus, différentes communautés d'ecto-mycorhizes ont été mises en évidence entre les deux types de sites : les sites secs présentent des types d'ecto-mycorhizes explorant à plus longue distance autour de la zone racinaire. Cette différence a été attribuée à une adaptation à la sécheresse et à la faible minéralité des sols. Ces sites sont en effet réputés pour leur faible contenu en matière organique et en éléments nutritifs essentiels (Augusto et al., 2006) et la faible réserve utile de leurs sols (Loustau et al., 1999). De plus, la fertilisation phosphatée n'est pas pratiquée sur ces sites, car pour être efficace, celle-ci doit être accompagnée de ressources en eau suffisantes (Trichet et al., 2009).

Par ailleurs, plusieurs expérimentations ont démontré que la contrainte hydrique s'exerce sur l'indice foliaire du peuplement à long terme (Guehl et al., 1994). De même, le ratio masse de racines fines/surface foliaire diminue avec l'augmentation de la disponibilité des nutriments, i.e. moins de nutriments favorise la croissance racinaire aux dépens de la croissance foliaire (Bakker et al., 2009). Les types de sols n'ont pas été considérés dans le cadre de cette étude, mais le site d'Escource pourrait être finalement plus limité par la pauvreté nutritionnelle du sol que par les facteurs hydroclimatiques, ce qui pourrait expliquer

qu'aucune des variables testées ici n'explique très significativement la croissance de ces peuplements. Trichet et al. (2008) montrent d'ailleurs que la croissance du Pin maritime est principalement limitée par la disponibilité des nutriments, et secondairement par l'eau.

4.5 Conclusion

L'étude dendrochronologique que nous avons réalisée pour un échantillon de sites où la profondeur de la nappe phréatique a été enregistrée depuis 2 à 4 décennies est une première dans la région des Landes de Gascogne. Elle apporte plusieurs résultats importants pour la gestion forestière de ce massif dont l'importance économique est majeure pour la région Aquitaine. Elle confirme que la croissance du Pin maritime landais est sensible bien aux variations climatiques : les chroniques d'indice de cernes I_c rendent compte de façon visible des années caractéristiques de faible ou de forte croissance observées par ailleurs (Bert, 2006). Son originalité principale est de mettre en évidence l'effet des variables hydroclimatiques sur la croissance du Pin maritime et de révéler certains aspects différenciant les types de landes.

Globalement, les sites de lande humide et de lande mésophile se comportent de façon relativement similaire, les années les plus favorables étant les mêmes pour ces deux sites, et les facteurs hydroclimatiques les plus corrélés à la croissance identiques. Dans le détail, la croissance aux sites de lande mésophile est toujours influencée positivement par la profondeur de la nappe. Cette influence est d'autant plus forte que la nappe est plus élevée, tandis que les sites de lande humide sont négativement influencés par une faible profondeur de la nappe en hiver, ce qui pourrait traduire la sensibilité des racines à l'immersion et l'anoxie. Les facteurs expliquant les différences de croissance en fonction du type d'alimentation hydrique et de l'âge sont multiples et ne sont pas strictement indépendant. La pluviométrie participant à la recharge de la nappe, cette variable est, bien sûr, liée à la piézométrie.

Dans cette étude, les relations avec les paramètres hydroclimatiques ont été testées un par un. Une analyse par régression expliquerait sans doute mieux les variations inter-annuelles de croissance, mais la dépendance entre variables rendrait une telle analyse complexe. De plus l'objectif de cette étude était d'abord d'analyser les relations entre croissance secondaire et régime de la nappe. En effet, il existe des modèles de croissance mécanistes représentant les peuplements forestiers de façon assez fiable, comme par exemple le modèle GRAECO (Porté, 1999 ; Loustau et al., 2005 ; Ciais et al., 2010) et reproduisant fidèlement la croissance des peuplements de lande humide (type Bray). Ce type de modèle permet d'appréhender les interrelations entre les différentes variables hydroclimatiques et l'action de leurs extrêmes sur des peuplements comparables. Au vu des résultats de cette étude, il est très probable que ce modèle puisse être porté aux sites de lande mésophile sans avoir à procéder à des modifications fondamentales. Cette relation entre végétation et nappe incite à analyser le fonctionnement de l'écosystème forêt à des échelles plus larges, tels que le bassin-versant, plutôt qu'à l'échelle de la parcelle qui ne peut être considérée comme une unité fonctionnellement autonome.

Peu de bibliographie existe sur le fonctionnement des peuplements de Pin maritime de lande sèche, qui représentent pourtant 14% de la surface du Massif forestier des landes de Gascogne. Ces peuplements se sont révélés peu corrélés aux variables hydroclimatiques

étudiées ici, probablement parce que ce n'est pas la limitation la plus forte pour ces sites et parce que le système racinaire de ces peuplements est déconnecté de la nappe plio-quaternaire. En effet, bien que la croissance soit presque toujours plus faible, quelque soit l'année considérée, ces peuplements semblent moins sensibles aux périodes de stress hydrique intense.

Chapitre V

Mesure et analyse des fluctuations de la nappe plio-quaternaire pour les bassins versants du Bouron et du Tagon (2009-2011).

"Un statisticien et un biologiste sont condamnés à mort. On leur accorde une dernière faveur.

- Je voudrais donner une grande conférence sur la statistique devant tout le monde, dit le statisticien.

- Accordé, répond le juge. Et pour vous ?

Le biologiste n'exprime aucune hésitation :

- Je souhaiterais être exécuté le premier."

(Gaël Millot, Comprendre et réaliser les tests statistiques à l'aide de R, 2009)

V. Table des matières

5.1	Introduction.....	165
5.2	Matériel et Méthodes	169
5.2.1	Données in situ	169
5.2.1.1	Données hydrologiques.....	169
5.2.1.2	Données d'inventaire forestier.....	169
5.2.2	Traitement des données piézométriques	171
5.2.2.1	Traitement des données brutes	171
5.2.2.2	Incertitude sur les valeurs mesurées.....	172
5.2.2.3	Etude des fréquences et de l'amplitude brute des oscillations du signal piézométrique 173	
5.2.3	Calcul des données d'ET	174
5.2.3.1	A partir des oscillations diurnes de nappe	174
5.2.3.2	A partir des bilans hydriques.....	176
5.2.3.1	A partir du modèle GRAECO	176
5.3	Résultats	179
5.3.1	Périodicité et amplitude des oscillations journalières du niveau d'eau.....	179
5.3.1	Bilans hydriques	185
5.3.2	Comparaison entre ETR estimée par GRAECO et ET_g calculée à partir des oscillations diurnes de nappe.....	186
5.4	Discussion	191
5.5	Conclusion	199

5.1 Introduction

L'évapotranspiration (ET) est le deuxième terme le plus important des bilans hydriques à l'échelle de petites régions après la pluie (Calder, 1999). L'évapotranspiration depuis un couvert végétal est contrôlée par les facteurs suivants: disponibilité en eau, rayonnement disponible, vitesse du vent, l'humidité et la température de l'air, nature et caractéristiques du couvert (hauteur, indice foliaire, composition spécifique, âge..), approvisionnement en eau de la frange capillaire et, dans certains cas, de la zone saturée. Il existe de nombreuses méthodes directes ou indirectes pour l'estimer dont le choix dépend de l'objectif recherché et des moyens disponibles (Fischer et al., 2011).

Une grande partie des publications hydrologiques se fonde sur les relations empiriques fortes existant entre les variables climatiques et l'ET pour estimer une ET potentielle (Penman, 1948 ; Gilli et al., 2008) dépendant soit uniquement de la température corrigée par un effet de la latitude (Thornthwaite, 1948), soit de la température et du rayonnement solaire (Turc, 1961), soit de l'humidité relative et du rayonnement net (Presley et Taylor, 1972), ou encore une combinaison de l'humidité relative, de l'altitude et de la saison (Formule de Primault ; Gilli et al. 2008). Ces relations peuvent aussi être fondées sur des processus physiques, tel que le bilan d'énergie, dans la formule de Penman (1948), qui prend en compte la température, le rayonnement net, la vitesse du vent, l'humidité relative, ainsi que, dans son développement ultérieur (Equation de Penman-Monteith), un terme lié à la végétation, i.e., la conductance stomatique et la conductance de la couche limite (Monteith, 1965). Il existe aussi une grande diversité de modèles biologiques décrivant les caractéristiques du couvert concernées de façon plus ou moins directe : dynamique phénologique, indice foliaire, fonctionnement stomatique, prélèvement racinaire, croissance et allocation (Kirschbaum et al., 2001; Landsberg, 2003a et 2003b). L'ET réelle peut être mesurée sur le terrain, via l'utilisation des bacs d'évaporation, des cases lysimétriques, des mesures de flux par des approches micrométéorologiques (covariances turbulentes, méthode des gradients), de bilan en eau du sol ou encore de mesure de flux de sève (Loustau et al, 1998 ; Gilli et al., 2008 ; Cosandey et Robinson, 2007; Fischer et al., 2011). Il est aussi possible d'estimer l'ET à partir de l'étude de données satellitaires, en utilisant les bilans d'énergie associés à des modèles empiriques ou physiques (Sahoo et al., 2011).

Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients. Si les méthodes de calcul empirique sont moins précises ou ne peuvent être calculées qu'à des pas de temps grossiers (par exemple, mensuel pour Thornthwaite), elles peuvent être mises en place dans des régions où les données météorologiques sont rares ou limitées, éventuellement au prix de la mise en place sur le site expérimental de quelques capteurs météorologiques simples. Ce n'est pas le cas pour la méthode de Penman, qui nécessite un équipement relativement plus important. Les méthodes de mesures directes, plus précises, sont néanmoins plus contraignantes, les bacs d'évaporation par exemple, nécessitent un suivi régulier (approvisionnement en eau). L'approche basée sur la mesure de fluctuation turbulente

(Aubinet et al., 2000) est la méthode la plus utilisée. Elle intègre le couvert entier, contrairement aux mesures de flux de sève, qui n'enregistrent que le comportement de quelques individus d'un peuplement. Une centaine de sites sont instrumentalisés selon cette méthode en Europe et environ 500 à l'échelle du globe (Sulkava et al., 2011). Cependant, elle nécessite un suivi et un post-traitement complexe ainsi qu'une instrumentation sophistiquée. Les données satellitaires présentent le grand avantage de pouvoir calculer une ET sur de grandes surfaces, et en particulier pour des zones peu accessibles, mais il subsiste un certain nombre d'erreurs d'estimation liées aux capteurs, aux algorithmes de traitement et aux incohérences spatiales et temporelles des résultats (Sahoo et al., 2011).

Une fraction de l'ET réelle peut être prélevée directement dans la zone saturée ou via la frange capillaire. Cette fraction, notée ET_g, est souvent méconnue, ignorée, ou estimée par simplification à une réduction linéaire fonction de la profondeur de l'aquifère (Mc Donald and Harbaugh, 1988 ; Banta, 2000). Vincke et Thiry (2008) ont démontré qu'il existe un lien fonctionnel entre l'ETR et l'ET_g dans le cas de peuplements de Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) poussant sur des sables limoneux en Belgique. De plus, mieux quantifier l'ET_g permettrait d'apprécier, mais aussi d'anticiper, la sensibilité des couverts à toute modification du niveau de nappe induite par la mise en place d'un réseau de drainage, d'un pompage, et/ou par une diminution de la recharge de l'aquifère liée au changement climatique (i.e., réduction des précipitations).

Historiquement, l'étude des prélèvements dans la zone saturée et la frange capillaire, s'est limitée aux espèces phréatophytes ou aux zones humides (Dolan et al., 1984 ; Gerla, 1992 ; Rosenberry et Winter, 1997), aux ripisylves (Lautz, 2008 ; Gribovski et al., 2010 ; Zhu et al., 2011), et aux fonds de vallées encaissées sans exutoire (White, 1932), via l'étude des oscillations diurnes du niveau de la nappe. White (1932) est ainsi un des tout premiers à avoir observé et prouvé que les oscillations de nappe étaient liées aux prélèvements par la végétation, via la comparaison de différents types de couverts à des sols nus, ainsi que via l'instrumentation de grands réservoirs végétalisés (méthode mise au point quelques années auparavant par Lee, 1912). La descente rapide de nappe observée pendant la journée est associée aux prélèvements directs, i.e. l'ET_g, tandis que la remontée nocturne est associée aux phénomènes de flux latéraux ou verticaux rechargeant la nappe par équilibrage des charges hydrauliques (écoulements darciens).

Ces oscillations ont pourtant, longtemps après l'étude de White, été attribuées aux fluctuations de la température (Czikowsky and Fitzjarrald, 2004), de pression barométrique (Turk, 1975), aux activités anthropiques (Bousek, 1933) ou bien encore aux effets de la marée (Senitz, 2001). Bien que ces raisons puissent être valables dans certains milieux particuliers, une littérature abondante a depuis prouvé que la cause principale des oscillations diurnes du niveau de nappe est bien liée aux prélèvements par les plantes (Bond et al., 2002 ; Loheide et al., 2005 ; Engel et al., 2005 ; Gribovski et al., 2006 ; Butler et al., 2007 ; Shah et al., 2007 ; Gribovski et al., 2008 ; Lautz, 2008 ; Loheide, 2008 ; Vincke et Thiry, 2008). L'amélioration technique des capteurs de mesures de niveau d'eau, via l'amélioration de la précision et

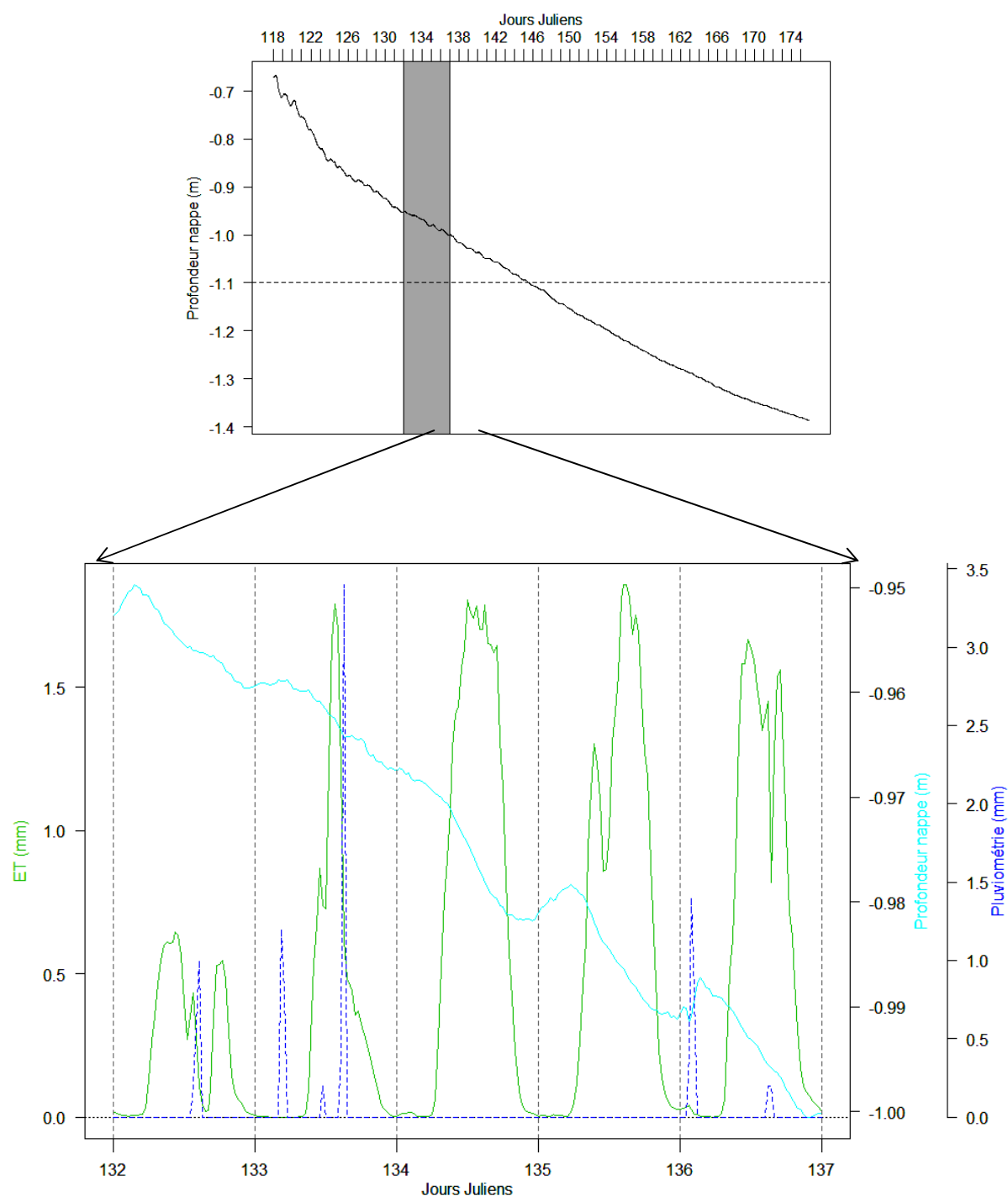


Figure V-1 : Profondeur de nappe (courbe turquoise), flux de sève (courbe verte) et pluviométrie (courbe bleue) pour le site du Bray (CarboEurope, Loustau D. et Bosc A., 2011, données non publiées) pour l'année 2004. Les oscillations diurnes de nappe sont cohérentes temporellement et quantitativement à l'importance des flux de sève : les oscillations sont de faible amplitude pour les jours 132 et 133, caractérisés par une ET réduite, et plus importante pour les jours 134, 135 et 136, où l'ET est forte.

l'augmentation de la mémoire, permettent de déployer des capteurs avec de haute fréquence d'enregistrement durant de longues périodes, ainsi que de généraliser et de renforcer les conclusions de White. Depuis quelques années, le champ d'application des oscillations diurnes de nappe s'élargit, et un certain nombre d'études s'intéressant à ce signal journalier apparaît, parfois même retranscrit dans les débits des bassins versants (Bond et al., 2002).

Les données enregistrées par l'INRA au site du Bray dans les Landes de Gascogne (El Hadj Moussa, 1989 ; Porté, 1999 ; Loustau et al., 1990), ont montré un type similaire d'oscillations diurnes visibles dans les chroniques de nappes, temporellement cohérentes avec les mesures de flux de sève effectuées sur le site (Figure V-1). L'amplitude de ces oscillations diminue jusqu'à devenir négligeable aux alentours de 1.2 m de profondeur, ce qui correspond à la profondeur d'enracinement sur le site (présence d'aliis induré à une profondeur allant de - 0.50 à -0.85 m; El Hadj Moussa, 1989).

Cela implique que le Pin maritime prélève une part de ses besoins en eau dans la zone vadose et une autre part directement dans la zone saturée. Il peut, à ce titre, être considéré comme semi-phréatophyte ou phréatophyte facultative, comme d'autres espèces forestières telles que l'Eucalyptus (Engel et al., 2005). Le bilan hydrique de peuplements de Pin maritime a fait l'objet de nombreuses recherches (El Hadj Moussa, 1989 ; Granier et al., 1990 ; Porté, 1999 ; Loustau et al., 1999 ; Berbigier et al., 2001) et l'ET réelle a été mesurée par la méthode des flux de sève (Loustau et al., 1990 ; Moreaux et al., 2011) et par la méthode des flux turbulents (Berbigier et al., 2001 ; Kowalski et al., 2003 ; Rivalland et al., 2005 ; Moreaux et al., 2011), mais la quantification de la part d'ET issue de l'utilisation des ressources en eau de la zone saturée n'a que rarement été abordée. L'étude des oscillations du niveau de nappe et son explication physique ou fonctionnelle n'a été entreprise que de façon fragmentaire (Brejon de la Vergnée, 1988).

Les mêmes oscillations journalières sont visibles pour les piézomètres installés sur les bassins versants du Bouron et du Tagon. Dans ce chapitre, les fluctuations diurnes des piézomètres sont étudiées, et les diverses causes possibles pouvant expliquer ce phénomène sont explorées. Nous démontrons que leur origine est effectivement reliée aux prélèvements de la végétation dans la nappe, en particulier en caractérisant sur de courtes périodes leur fréquence et leur amplitude, par l'application de transformées de Fourier. Puis par une analyse journalière des pentes diurnes, une ET_g journalière est estimée. En l'absence de mesure de l'ET réelle sur les sites, le modèle GRAECO (voir chapitre II) est utilisé pour calculer une ET pour chaque site dont la couverture végétale correspond à des Pins maritimes. Une étude des corrélations entre l'ET issue du modèle GRAECO et l'ET_g calculée à partir des oscillations diurnes de nappe est finalement réalisée, permettant de mettre en évidence la variabilité des relations entre le Pin maritime et la nappe plio-quaternaire. L'influence forte des conditions locales, telle que la proximité au réseau de drainage et/ou l'organisation des horizons de sol, est, elle aussi, soulignée.

5.2 Matériel et Méthodes

5.2.1 Données in situ

5.2.1.1 Données hydrologiques

Le suivi piézométrique²¹ a été réalisé de juin 2009 à août 2011 sur un réseau de 15 piézomètres ouverts répartis sur les deux bassins versants. Au site du Tagon, deux capteurs ont été dérobés suite au vandalisme des stations expérimentales. Ainsi, les mesures pour le site d'Aiguemorte ne sont plus disponibles depuis novembre 2010, et, pour le site de Vigneau, depuis mars 2011. La sonde de Lembarras est défectueuse depuis juillet 2011. Une mesure de contrôle manuelle est prise à chaque visite (au moins une fois par mois) à l'aide d'une sonde de mesure Hydrosen Typ010 (Silex International, Ennery, France).

Les données de débit, utilisées pour les deux bassins versants entre décembre 2009 et février 2011, ont été décrites en détail au chapitre II.

5.2.1.2 Données d'inventaire forestier

A l'aplomb des piézomètres, un inventaire simplifié des peuplements de Pin maritime a été réalisé en 2011 (Tableau V-1), afin d'obtenir les données essentielles pour l'utilisation du modèle GRAECO : l'âge (calculé à partir du nombre total de verticilles des arbres), la densité et le DBH des arbres (estimés à partir d'un échantillon aléatoire de 20 individus). Les sites n'ayant pas un couvert de Pin maritime n'ont pas fait l'objet d'un inventaire (c'est le cas des piézomètres installés dans les airiaux²², traditionnellement plantés de feuillus).

Tableau V-1 : Caractéristiques des peuplements forestiers à l'aplomb des piézomètres, inventoriés en 2011

	Site	Age	Densité (tiges/ha)	DBH moyen (cm, EC)	Surface de la parcelle (ha)	Notes complémentaires
Bouron	Fraye	27	306	41.74 7.75	0.5	
	Grand Cal	10	1113	3.16 0.81	7.3	
	Hillan (C1)	14	900	18.33 4.00	1.2	
	Les Serres	21	292	28.04 9.36	10.0	
Tagon	Aiguemorte	28	260	38.99 7.31	11.0	
	Matoucât	33	40	50.77 7.27	12.6	Peuplement rasé en quasi-totalité après la tempête de 2010

²¹ Pour les caractéristiques techniques des forages, i.e. dispositif de mesure et équipement, se référer au chapitre II.

²² terme vernaculaire : aire, espace vacant, terrain autour d'une maison (Alibert, 1977)

Tableau V-2 : Gamme de profondeur des piézomètres mesurés et corrections apportées sur les données.

	Site	Date début	Profondeur de forage (m)	Côte (m NGF)	Profondeur de niveau d'eau par rapport au sol (m)				Paramètres de correction Mesures Manuelles		RM/SE après correction (mm)	Paramètres de correction 2009 (Patm Bilos)	
					Moyenne	Maximale	Date	Minimale	a	b		a	b
Bouron	Frave	19/05/2009	7.81	52.3	1.30	2.38	27/10/2010	0.30	0.987	0.016	11.5	1.001	-0.012
	Grand Cal	19/05/2009	6.58	44.31	1.65	2.62	26/10/2010	0.64	0.984	0.009	15.1	0.994	-0.003
	Hillan (C1)	02/06/2009	6.78	54.38	2.16	3.01	29/10/2010	1.33	1.003	-0.008	5.3	0.995	0.008
	Lembarras	02/06/2009	6.81	63.29	5.57	6.27	14/11/2009	4.93	1.037	-0.196	24.5	1.021	-0.122
	Les Serres	19/05/2009	8.44	55.35	1.23	1.64	21/09/2010	0.63	0.946	0.006	11.7	0.991	-0.001
	Les Pijoulets	19/05/2009	8.38	63.74	2.51	3.65	10/11/2010	1.28	0.997	-0.002	17.1	1.007	-0.036
	Retis	19/05/2009	6.85	65.79	0.96	1.62	04/10/2010	0.14	0.992	0.137	17.0	0.999	-0.008
Tagon	Aiguemorte	23/09/2009	7.78	27.82	1.71	2.53	21/09/2010	0.98	0.995	0.130	10.3	1.000	0.000
	Les Gasiets	30/09/2009	7.65	40.26	0.93	1.47	04/10/2010	0.36	0.987	0.035	7.7	1.001	-0.005
	Matoucat	30/09/2009	6.73	44.97	1.00	1.73	23/10/2010	0.24	0.992	0.052	15.8	0.992	0.007
	Mongrand	23/09/2009	7.695	17.83	1.13	1.77	23/10/2010	0.48	0.999	0.058	7.0	0.990	0.004
	Vigneau	05/06/2009	10.445	13.55	1.16	2.22	09/10/2010	0.36	1.009	-0.016	9.5	1.004	-0.005

5.2.2 Traitement des données piézométriques

5.2.2.1 Traitement des données brutes

Les fichiers de données des capteurs de pression immergés dans les piézomètres (P_{totale}) et de pression atmosphérique ($P_{atmosphérique}$) sont récupérés sur le terrain à l'aide d'une station base optique USB U4 et du logiciel HOBOWare Pro 3.0.0 (Onset Computer Corporation, Cape Cod, Massachusetts).

L'ensemble des quatre traitements suivants est réalisé sous R (R Development Core Team, 2010), successivement :

(1) calcul de la hauteur de la colonne d'eau située au dessus du capteur H_{eau} (m), pour chaque demi-heure du fichier:

$$H_{eau} = \frac{P_{hydrostatique}}{(\rho * g)} \quad (Eq. 5.1)$$

avec ρ la masse volumique de l'eau (999.66 kg.m^{-3}), g l'accélération de la pesanteur (9.81 m.s^{-2}) et la $P_{hydrostatique} = P_{totale} - P_{atmosphérique}$ (Pa).

Avant octobre 2009, les capteurs de pression atmosphérique n'étaient pas installés sur les bassins versants, par conséquent, la pression atmosphérique acquise sur un site expérimental INRA voisin (Bilos, à 18 km et 20 km à vol d'oiseau du Bouron et du Tagon respectivement) a été utilisée. Une comparaison des deux pressions atmosphériques d'octobre 2009 à mai 2010, a permis de corriger les données de Bilos. Les deux pressions varient de façon identique temporellement (pente proche de 1), et un offset a du être corrigé (Tableau V-2).

(2) correction des erreurs de mesure par comparaison avec les mesures manuelles. La valeur manuelle est comparée à la mesure HOBOWare de la même demi-heure. Les capteurs HOBOWare présentent parfois un décalage constant de quelques centimètres avec la mesure manuelle. Ce décalage ne varie pas dans le temps (pas de dérive), mais peut varier selon la profondeur. Un modèle linéaire, entre mesure manuelle et mesure HOBOWare, est donc ajusté afin de corriger les valeurs mesurées par le HOBOWare. La vraie hauteur d'eau est obtenue par :

$$H_{eau_{corr}} = a * H_{eau} + b \quad (Eq. 5.2)$$

avec a et b les paramètres du modèle ajusté (Tableau V-2) selon les sites.

(3) calcul de la profondeur de la nappe par rapport au sol :

$$Profondeur_{nappe} = H_{ref} - H_{eau_{corr}} \quad (Eq. 5.3)$$

avec H_{ref} la profondeur du capteur par rapport à la surface du sol (voir Figure II-11, chapitre II).

(4) stockage des différentes chroniques piézométriques dans un fichier global unique par site, puis par bassin versant.

5.2.2.2 Incertitude sur les valeurs mesurées

Il existe plusieurs types d'erreurs associées au traitement des données, i.e. liées au calcul : les constantes choisies, la pression atmosphérique utilisée, le choix de la demi-heure pour la calibration avec les mesures manuelles, la précision de la mesure manuelle du niveau d'eau et de la mesure de la profondeur du capteur (hauteur de référence).

Pour le calcul de la hauteur de la colonne d'eau, la masse volumique et l'accélération de la pesanteur sont considérées comme constantes. La masse volumique de l'eau douce varie entre 999.66 kg.m^{-3} à 10°C et 999.06 kg.m^{-3} à 15°C (Harvey, 1995). Sur une échelle de 0 à 9 m (gamme de mesure des sondes HOBO), la comparaison des hauteurs de colonne d'eau, calculées à partir de ces deux valeurs de constantes, montre que l'erreur est négligeable ($a=1.0$, $b=7.7\text{e-}20$, $R^2=1$). L'altitude, la latitude, l'accélération d'entraînement centrifuge et la densité du sous-sol sont sensiblement égales entre nos sites, l'accélération de la pesanteur peut donc être considérée comme identique entre les sites et elle ne dépend pas du temps. Une variation de 0.2 m.s^{-2} produit une erreur négligeable ($a=1.0$, $b=0.0\text{e+}00$, $R^2=1$).

La pression atmosphérique mesurée depuis octobre 2010 étant mesurée avec le même type de sonde que la pression totale, l'erreur et la dérive des capteurs sont identiques ; la précision est supérieure à 0.02 kPa. Les données de pression atmosphérique utilisées avant cette date proviennent d'un capteur CS105 (Moreaux et al., 2011), de précision égale à 0.05 kPa. Les données antérieures à octobre 2009 sont donc moins fiables.

Dans le processus de traitement, la demi-heure choisie pour la calibration entre mesure HOBO et mesure manuelle est la demi-heure précédant le retrait de la sonde du piézomètre pour la récupération des fichiers de données, tel que le constructeur le recommande (Onset Computer Corporation, 2008). Ce choix peut-être remis en cause, puisque dans de rares cas, cette mesure peut correspondre au moment où la sonde est relevée, avant la récupération du fichier. En réalité, la sonde est très réactive (< 1 seconde) aux changements de pression et une telle erreur est visible. Un test a été réalisé afin de voir quelles seraient les modifications dans la mesure finale en fonction du choix de la demi heure de comparaison avec la mesure manuelle (1h30, 1h et 30 minutes avant et après la mesure manuelle, et même demi-heure), la différence est en moyenne de 7 mm.

La correction avec les mesures manuelles permet néanmoins de corriger les erreurs systématiques des capteurs (i.e., "Offset"). La RMSE après correction est indiquée dans le Tableau V-2. En règle générale, la valeur est de 1 cm, ce qui est en cohérence avec la précision de la mesure manuelle. La correction sur les mesures manuelles est très proche de la droite 1:1. Pour le Tagon, l'erreur standard résiduelle est inférieure à 0.016 pour plus de 30

ddl, et pour le Bouron, elle est inférieure à 0.045 pour plus de 20 ddl. Les valeurs des paramètres du modèle de correction sont statistiquement très significatives ($p < 0.001$). Les paramètres des modèles de correction, apportés sur les valeurs calculées avec la pression atmosphérique de Bilos, sont significatifs ($p < 0.001$), avec, pour les deux bassins versants une erreur standard résiduelle inférieure à 0.088 sur plus de 7480 ddl.

Enfin, la précision sur la hauteur de référence a une précision centimétrique. Toutes ces erreurs ne modifient pas l'amplitude des oscillations. En revanche, on peut considérer que sur la hauteur absolue de la nappe, l'erreur est de plus ou moins 3.41 cm.

La comparaison des valeurs de référence mesurées manuellement n'a pas permis de mettre en évidence une dérive des capteurs. Le constructeur donne une dérive de 0.3% par an (pleine échelle) dans le pire des cas, ce qui, dans les gammes mesurées au cours de cette étude (i.e, les colonnes d'eau mesurées au dessus du capteur), correspondrait à une dérive de 3 mm à 2.1 cm par an, soit presque 1 à 6.3 cm au bout des 3 ans de mesures. Cette valeur est supérieure ou égale à la sensibilité de la mesure manuelle (précision de 1 cm), la dérive dans notre cas est inférieure à 0.3% par an.

La résolution du capteur est de 2.1 mm, l'erreur pleine échelle (0-9m) de plus ou moins 0.1%, par conséquent seules les oscillations supérieures à 2.1 mm sont considérées comme interprétables dans les traitements subséquents.

5.2.2.3 *Etude des fréquences et de l'amplitude brute des oscillations du signal piézométrique*

L'objectif est d'étudier sur de courtes périodes (15 jours) les oscillations du signal piézométrique en termes de fréquence (en nombre de cycles par jour) et d'amplitude brute moyenne correspondante (en mm). Un premier traitement du signal piézométrique sera réalisé via l'application de transformées de Fourier discrètes, afin de retrouver le spectre en fréquence du signal piézométrique échantillonné, $s(n)$:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) * e^{-2i\pi k \frac{n}{N}} \quad 0 \leq k \leq N \quad (Eq. 5.5)$$

avec N, le nombre d'échantillons.

L'analyse est conduite sous Octave (Eaton, 2002). La tendance d'ordre n de la série est retirée, puis le spectre des amplitudes est analysé afin de retrouver les fréquences caractéristiques du signal piézométrique (étude réalisée en collaboration avec Rejiba, F., Université de Pierre et Marie Curie, Paris 6). Afin d'inter-comparer les piézomètres, seule la plus longue période commune à tous les sites, pour chaque période d'étiage, est conservée.

5.2.3 Calcul des données d'ET

Différentes méthodes, directes ou indirectes, permettant d'estimer l'ET seront utilisées : (1) l'analyse des oscillations diurnes de nappe, (2) le bilan hydrique à l'échelle du bassin versant, ou (3) l'ET calculée par le modèle GRAECO (Chapitre II).

5.2.3.1 A partir des oscillations diurnes de nappe

Cette analyse a pour but de quantifier la variation du stock d'eau dans la nappe, ΔW (mm.jour⁻¹), par l'analyse des fluctuations horaires de la profondeur de la nappe au cours d'une journée. Elle a été conduite sous R (R Development Core Team, 2010). L'approche utilisée correspond à une version généralisée de la méthode de Schilling (2007), qui s'écrit :

$$dW = \sum (D_i - D_{i-1}) * S \quad (Eq. 5.6)$$

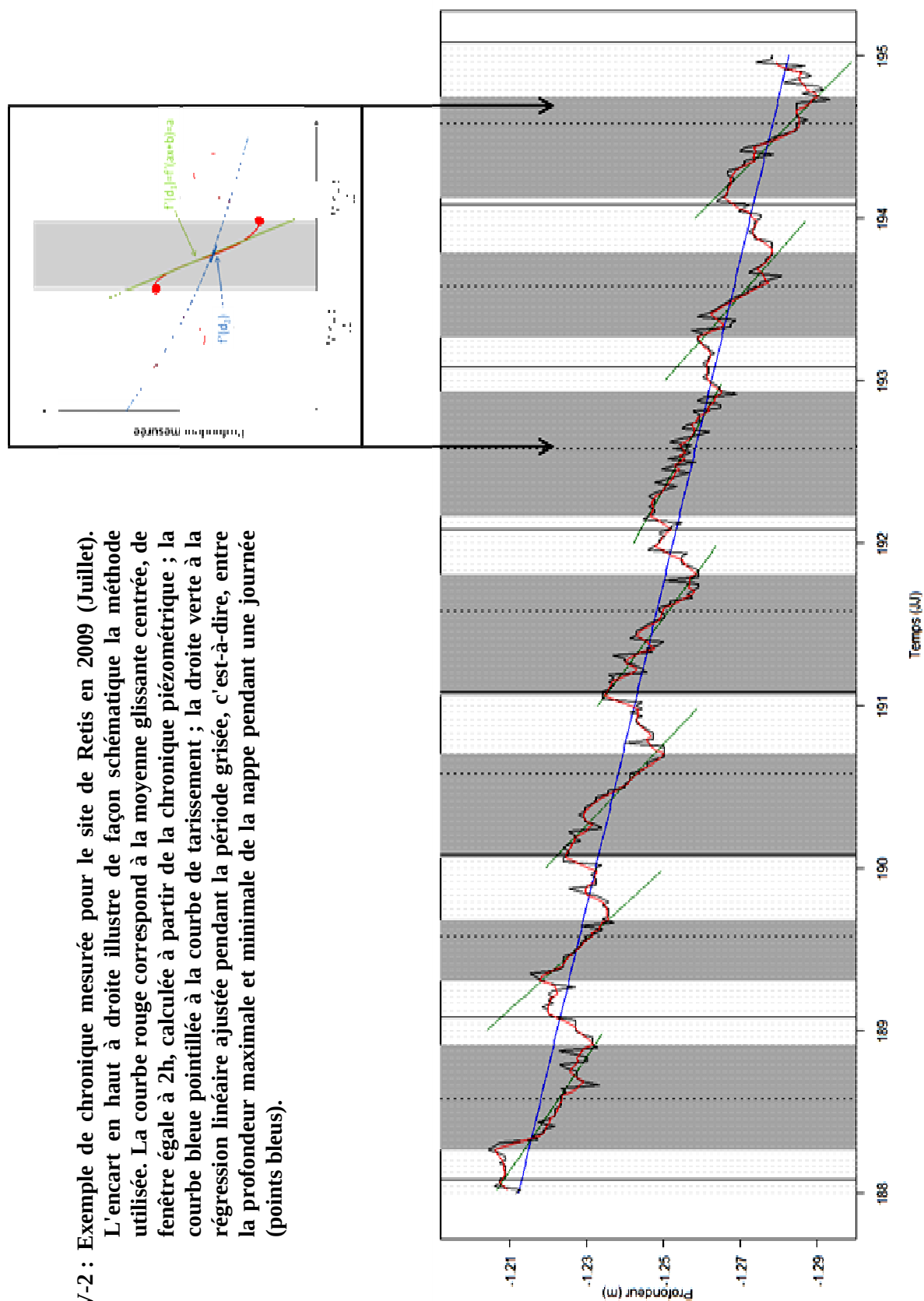
Avec D_i et D_{i-1} la profondeur observée pour l'heure i et $i-1$ respectivement, S la porosité efficace. Cette dernière est considérée comme constante entre les sites. Nous avons utilisé une valeur de $0.23 \pm 0.03 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ à partir des données d'humidité volumique mesurées entre les profondeurs de -0.1 et -0.8 m à la capacité au champ (1er et 2 mars 2005) et à la saturation (mars 2006, nappe > -0.1m) au site du Bray (projet CarboEurope). Contrairement à Schilling (2007), aucune hypothèse n'est formulée quant à la fenêtre temporelle à utiliser (fixée entre 10:00 et 18:00 dans l'étude de Schilling, 2007, pour le couvert forestier). De plus, la méthode est généralisée : au lieu de calculer un ΔD pour chaque heure, une droite est ajustée à la décrue journalière afin de retrouver directement la pente de décrue en mm.jour⁻¹ (Figure V-2). Par ce biais, l'impact du bruit associé à la mesure, i.e., les écarts entre deux mesures successives qui ne sont pas attribuables à un changement réel de profondeur de nappe, est réduit. La pente diurne est calculée par ajustement d'une droite entre le niveau maximum et le niveau minimum de la nappe sur une journée (entre minuit et minuit). Ces points sont déterminés à partir de la moyenne mobile sur 2h afin de limiter l'impact des pics erratiques dus au bruit sur le signal piézométrique mesuré. La variation de stock de nappe, ΔW , est donc estimée selon la formule :

$$ET_g = S * \frac{dD_{ab}}{dt_{ab}} \quad (Eq. 5.7)$$

avec a et b les pas de temps pour lesquels la profondeur minimale et la profondeur maximale journalières sont atteintes.

Afin de calculer la part de ΔW qui correspond à une vidange de la nappe, une courbe est ajustée sur toute la période d'étiage (Figure V-3), on a supposé que la courbe moyenne de

Figure V-2 : Exemple de chronique mesurée pour le site de Retis en 2009 (Juillet).
 L'encart en haut à droite illustre de façon schématique la méthode utilisée. La courbe rouge correspond à la moyenne glissante centrée, de fenêtre égale à 2h, calculée à partir de la chronique piézométrique ; la courbe bleue pointillée à la courbe de tarissement ; la droite verte à la régression linéaire ajustée pendant la période grisée, c'est-à-dire, entre la profondeur maximale et minimale de la nappe pendant une journée (points bleus).



variation de la nappe sur la période et hors précipitation correspond à cette vidange sur la période ; nous revenons sur cette hypothèse dans la discussion. La pente de la courbe de tarissement ainsi ajustée sur la période d'étiage, donnée par sa dérivée en fonction du temps (mm.jour^{-1}), permet de connaître la décharge de l'aquifère, notée *ref*, selon la nomenclature de Engel et al. (2005). Cette décharge est soustraite de ΔW pour calculer le prélèvement dans l'aquifère par la végétation, noté ET_g . Les formules utilisées, leurs dérivées, les sites et la période sur lesquelles ils ont été appliqués sont résumés dans le Tableau V-3.

Au bilan, le prélèvement par évapotranspiration est donc calculé par :

$$ET_g = S * \left(\frac{dD_{ab}}{dt_{ab}} - ref \right) \quad (Eq. 5.8)$$

Le calcul est effectué pour tous les jours où la recharge par la pluie est nulle, au cours de l'étiage 2010 et lorsque les données sont disponibles.

5.2.3.2 A partir des bilans hydriques

L'évapotranspiration totale ET peut être estimée à partir de la méthode des bilans de masse. Pour une année hydrologique, i.e. période entre deux dates pendant laquelle les exportations souterraines et les variations de stock sont considérées comme nulles, l'ET est estimée par la différence pluie moins écoulement (Ambroise, 1999) :

$$ET = P - Q \quad (Eq. 5.4)$$

avec P hauteur annuelle des précipitations (mm.an^{-1}) et Q hauteur de l'écoulement annuel à l'exutoire du bassin versant, ramenée à une surface unitaire de 1 m^2 (mm.an^{-1}).

Le pic de crue atteint par la nappe lors de l'hiver 2010-2011 a été moins élevé sur certains piézomètres que le pic de crue de l'hiver 2009-2010. Le bilan hydrique a été établi pour chaque piézomètre sur une période allant de la date du maximum de crue 2010-2011 à la date où la même valeur de profondeur de nappe est obtenue lors de la crue de l'hiver précédent.

5.2.3.1 A partir du modèle GRAECO

Le modèle GRAECO (décrit au chapitre II), a été utilisé pour retrouver une évapotranspiration réelle (ETR) sur chaque site dont le couvert est composé de Pin maritime, durant l'année climatique 2010 (01/01/2010 à 31/12/2010). Les peuplements sont initialisés à partir de l'inventaire réalisé à proximité des piézomètres (Tableau V-1). Le forçage climatique est réalisé à partir des données au point de la maille SAFRAN la plus proche (N° 7746 pour le Tagon, N° 7498 pour le Bouron). Aucune éclaircie n'est considérée pendant la période de simulation.

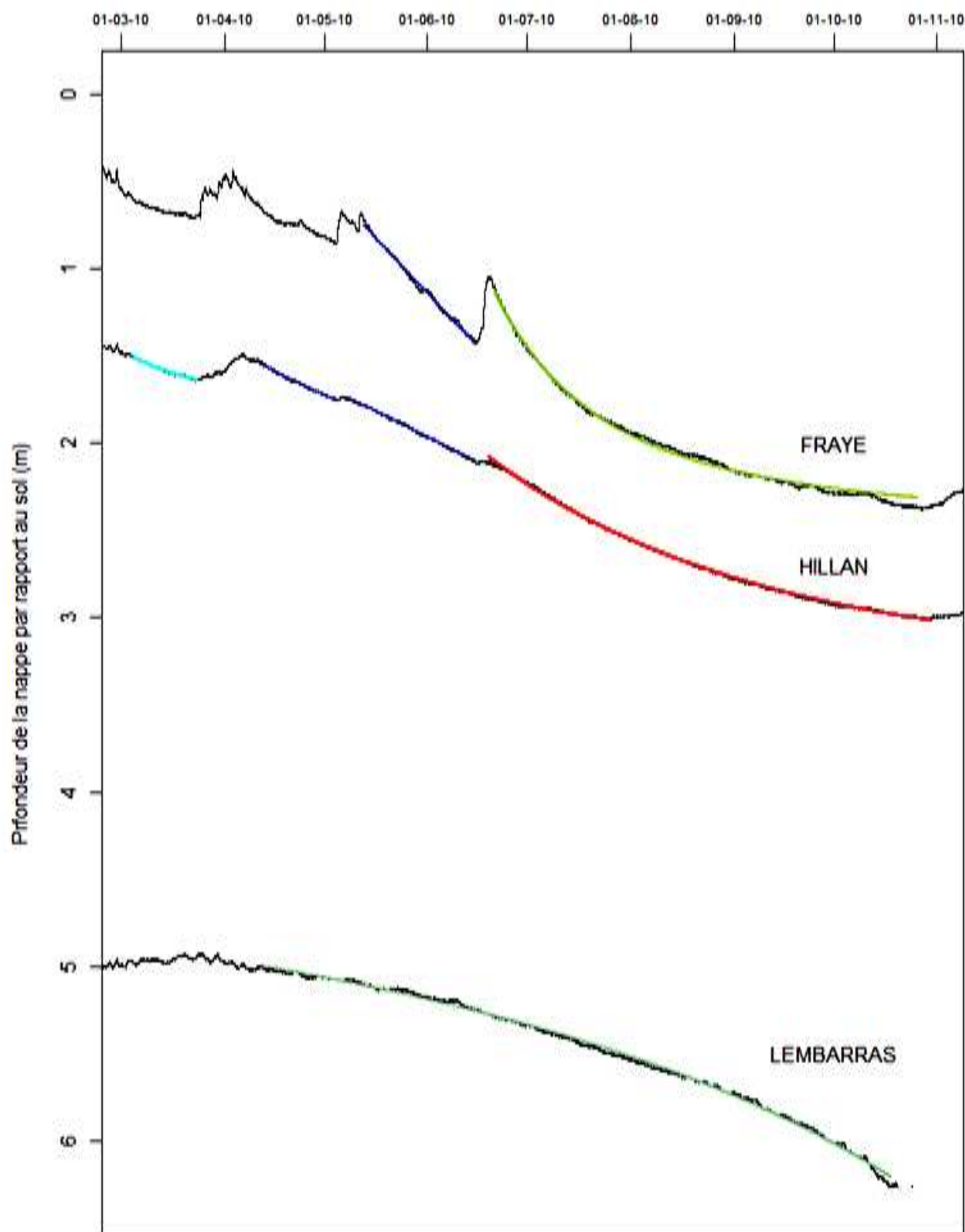


Figure V-3 : Exemple d'ajustements pour 3 sites. Les équations correspondant au code couleur des courbes ajustées se trouvent dans le Tableau V-3

Tableau V-3 : Equations utilisées pour les ajustements et leurs dérivées pour le calcul de la pente en chaque point.

Formule	Source	Dérivée	Piézomètre et période	
$P_o * \exp(\alpha * t)$	Formule de Maillet (Castany, 1964)	$\alpha * P_o * \exp(\alpha * t)$	GrandCal	08-avr - 03-mai
			Hillan	05-mars - 25-mars
			Matoucat	20-juin - 02-oct
$\frac{P_o}{(1 + \alpha * t)^2}$	Formule de Tison (Castany, 1964)	$-\frac{2\alpha * P_o}{(1 + \alpha * t)^3}$	Fraye	22-juin - 25-oct
			La Serre	01-mars - 24-mars
				06-avr - 03-mai
				09-mai - 14-juin
				20-juin - 30-sept
			Retis	01-mars - 22-mars
				08-avr - 03-mai
				20-juin - 30-sept
			Les Gestets	20-juin - 02-oct
$\alpha * t + P_o$	-	α	Fraye	13-mai - 14-juin
			GrandCal	04-mars - 23-mars
			Hillan	05-avr - 03-mai
				09-mai - 14-juin
			Retis	13-mai - 14-juin
			Aiguemorte	13-mai - 14-juin
			Les Gestets	13-mai - 29-mai
			Matoucat	13-mai - 14-juin
			Mongrand	08-mai - 08-juin
			Vigneau	13-mai - 14-juin
$P_o + \beta * 2^{(-\frac{t}{\delta})}$	Venables et Ripley (2002)	$-\frac{\beta}{\delta} * \ln(2) * 2^{(-\frac{t}{\delta})}$	GrandCal	11-mai - 25-oct
			Hillan	20-juin - 29-oct
			Pijoulets	14-avr - 01-oct
			Aiguemorte	20-juin - 30-sept
			Mongrand	20-juin - 02-oct
			Vigneau	20-juin - 02-oct
$P_o + \frac{1}{\alpha * t + \varepsilon}$	-	$\frac{-\alpha}{(\alpha * t + \varepsilon)^2}$	Lembarras	11-mai - 25-oct

5.3 Résultats

La profondeur du niveau d'eau mesurée dans les piézomètres étudiés varie entre 5.57 m à Lembarras et 0.96 m à Retis en moyenne (Tableau V-2). Ces deux piézomètres appartiennent au bassin versant du Bouron, qui présente donc la gamme de variation la plus importante. La profondeur du niveau d'eau mesurée dans les piézomètres du bassin versant du Tagon est en effet moins variable, avec une gamme s'étendant de 1.71 m à Aiguemorte à 0.93 m aux Gestets.

L'hiver 2009-2010 est le plus humide des deux périodes de crue étudiées. La recharge hivernale n'a pas été suffisante en 2010-2011 (voir Figure II-12 et Figure II-13, Chapitre II), mais ce déficit a été compensé par un été très pluvieux en 2011. En conséquence, le niveau d'étiage le plus faible, durant la période d'étude, a été mesuré aux environs d'octobre 2010 (N.B. : des données sont manquantes au piézomètre de Lembarras, car le forage réalisé n'est pas assez profond pour mesurer la profondeur du niveau d'eau en période d'étiage).

5.3.1 Périodicité et amplitude des oscillations journalières du niveau d'eau

L'analyse par transformée de Fourier discrète permet de retrouver les fréquences caractéristiques des chroniques piézométriques et leur amplitude. Une illustration des résultats est représentée dans la Figure V-4. Les oscillations journalières sont bien visibles et la fréquence correspondante ressort nettement sur le spectre en amplitude.

Les résultats par quinzaine sont visibles en Figure V-5 et dans le Tableau V-4. Elles ont été réalisées entre les 20/06/2009 et 17/09/2009, les 20/06/2010 et 2/10/2010 et les 11/04/2011 et 23/08/2011. Les données pour l'année 2009 sont peu informatives, suite à un problème technique sur la centrale d'acquisition des données du site de Bilos entre mi-juillet et mi-août. En effet, bien que ces données ne paraissent pas hors de la gamme des amplitudes observées sur la période d'étude, les valeurs sur cette période doivent être considérées avec prudence.

Les réponses sont contrastées entre les deux bassins versant. Pour le bassin versant du Bouron, une succession de périodes de plus fortes oscillations suivies de plus faibles oscillations peut être observée. En 2009, une première réduction des oscillations est visible mi-juin, suivie d'une nouvelle diminution mi-juillet. En 2010, la réduction de l'amplitude des oscillations est plus progressive, elle atteint un minimum en juillet, puis augmente à nouveau début août, pour diminuer enfin jusqu'en septembre. En 2011, les valeurs sont toujours plus faibles, avec une réduction notable en mai, une reprise début juin, et à nouveau une diminution à partir de mi-juin.

Sur ce bassin, le site des Pijoulets se distingue de tous les autres lieux. En effet, la fréquence 1 cycle.jour⁻¹ n'est jamais très marquée. Ce site se caractérise en revanche par des oscillations à la fréquence 2 cycles.jour⁻¹ dont l'amplitude peut être supérieure à l'amplitude de la fréquence 1 cycle.jour⁻¹ (données non montrées). Ce n'est pas le seul à présenter cette caractéristique, les autres sites présentent un léger pic dans le spectre des amplitudes pour

cette fréquence, cependant, l'amplitude y est souvent faible (> 2.1 mm) et n'est visible qu'en fin de saison de végétation, alors qu'elle est récurrente aux Pijoulets.

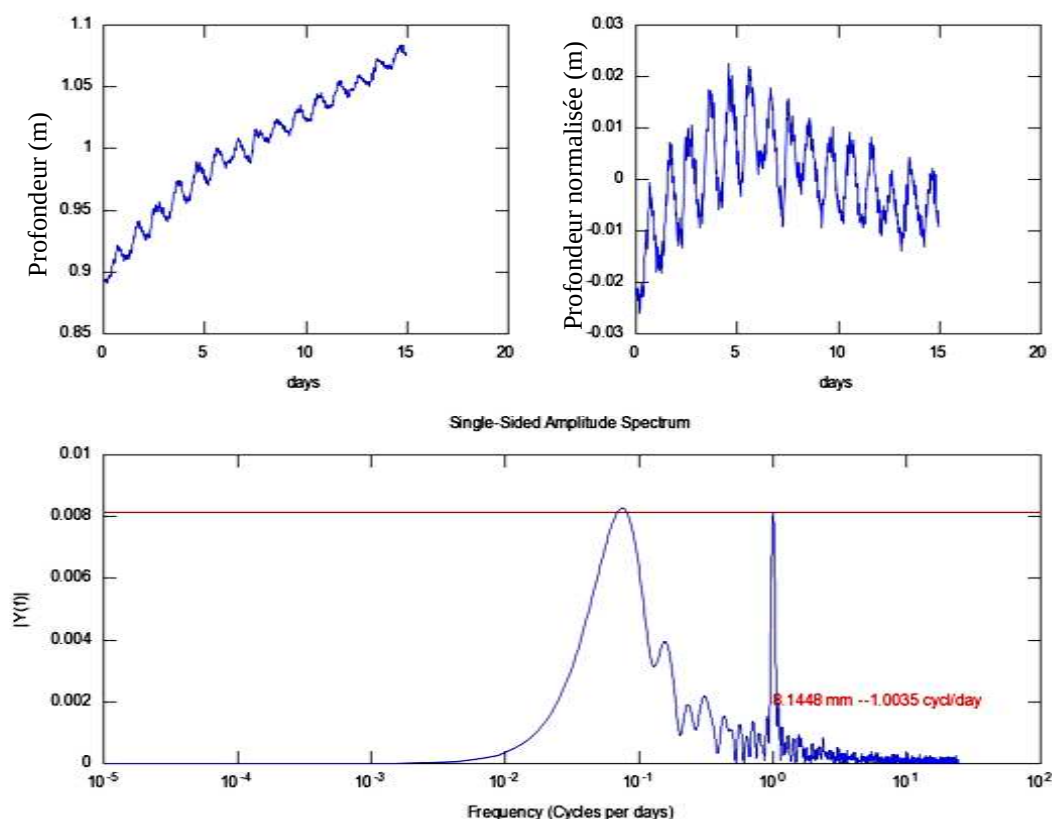


Figure V-4 : Spectre des amplitudes en fonction des fréquences obtenues pour le piézomètre Les Gestets, sur la période du 10 juin 2011 au 24 juin 2011, à partir d'une analyse par transformées de Fourier. Graphique en haut à gauche : série de chroniques piézométriques originales est figurée, avec en abscisse, le nombre de jours depuis le 10 juin 2010 et en ordonnée la profondeur par rapport au sol. Graphique en haut à droite : même chronique sur laquelle la tendance d'ordre n (déterminé automatiquement par l'algorithme sous Octave) a été retirée. Graphique inférieur : spectre d'amplitude.

Le site du Tagon ayant été équipé plus tard, les données sont moins nombreuses. Vigneau doit être considéré séparément. En effet, le piézomètre se trouve à proximité d'une mare dans laquelle des pompes pour irrigation sont effectués. C'est ainsi le seul site où les oscillations journalières augmentent avec la saison de croissance de la végétation, ceci est à mettre en relation avec les prélèvements croissants par pompage pour l'irrigation au cours de la saison estivale. En 2010, pour les autres sites, les oscillations diminuent progressivement au fur et à mesure de la saison de croissance de la végétation. L'année 2011 est particulière : sur ce bassin versant, la nappe est superficielle, et chaque événement pluvieux entraîne une remontée de nappe quasi-immédiate (Voir Figure II-13, Chapitre II). Le signal des oscillations journalières est perturbé par ces remontées de nappe pour les sites des Gestets et de Matoucat.

Tableau V-4 : Fréquence (C, en jour⁻¹) et amplitudes (A, mm) des pics remarquables sur les spectres issus de l'analyse du signal piézométrique par la méthode des transformées de Fourier. Les valeurs grisées correspondent aux valeurs éliminées dans cette analyse (défaut de la station de mesure de la pression atmosphérique) ou manquantes.

		Bouron												Tagon											
Fraye		Grand Cal		Hillan C1		Lembarras		Les Serres		Pijoulets		Retis		Vigneau		Les Gestets		Matoucat		Aiguemorte		Mongrand			
A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C		
2009	20-juin	04-juil	6.0	0.996	2.2	0.996	2.6	0.996	2.6	0.996	3.2	0.999	1.5	1.004	4.1	1.002	4.1	1.002	4.1	1.002	4.1	0.996	NA	NA	
	05-juil	19-juil	4.8	1.022	2.8	1.002	3.1	1.004	2.4	1.004	3.5	1.001	3.4	0.996	5.4	0.999	3.0	0.996	3.0	0.996	3.0	0.996	NA	NA	
	20-juil	03-août	2.8	1.004	2.2	1.004	2.0	1.004	2.2	1.004	2.9	1.004	1.8	0.996	2.7	1.004	2.3	0.996	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	04-août	18-août	3.1	1.001	2.6	1.004	2.9	1.004	2.5	1.004	3.7	1.004	1.5	0.996	3.6	0.996	2.4	0.998	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	19-août	02-sept	1.9	1.004	1.8	1.004	2.2	1.002	1.8	1.004	2.1	1.004	1.0	1.004	NA	NA	2.7	1.004	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
2010	03-sept	17-sept	2.0	1.004	2.5	1.004	2.5	1.004	2.6	1.004	2.0	1.004	1.1	1.004	2.1	1.004	7.2	1.001	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	20-juin	04-juil	8.6	1.004	3.7	0.998	3.6	0.996	3.7	0.998	5.1	1.004	2.0	0.996	5.9	1.004	4.4	1.004	8.6	1.004	5.0	1.004	3.0	0.996	
	05-juil	19-juil	5.2	1.004	3.6	1.004	3.8	1.004	3.6	1.001	4.1	1.004	2.3	0.996	4.7	1.004	5.0	0.996	5.1	1.001	3.6	1.002	3.6	0.999	
	20-juil	03-août	3.6	0.996	2.7	0.996	2.8	1.001	3.1	0.999	3.0	0.996	1.9	1.004	3.0	0.996	5.9	1.001	3.9	1.001	3.7	0.999	3.4	0.999	
	04-août	18-août	3.0	1.004	2.8	1.004	2.9	1.004	3.0	1.004	2.6	1.004	1.1	0.996	2.8	1.004	7.6	0.998	3.6	1.004	3.6	1.004	3.1	1.000	
2011	19-août	02-sept	3.6	1.002	3.5	1.004	3.9	1.004	3.9	1.001	3.8	1.004	2.3	0.991	3.5	1.004	9.4	0.998	2.6	1.004	2.4	1.004	2.5	1.004	
	03-sept	17-sept	3.3	1.002	2.9	1.004	3.1	1.002	3.2	1.001	3.1	0.996	1.2	0.996	2.2	0.998	6.9	0.998	1.5	1.004	1.7	1.004	1.6	1.002	
	18-sept	02-oct	2.7	1.004	2.5	1.004	3.0	1.004	2.8	1.004	2.2	1.004	1.7	0.999	1.9	0.999	5.9	0.998	1.0	1.002	1.6	0.999	NA	NA	
	11-avr	25-avr	2.5	0.996	2.0	1.000	2.7	0.996	2.9	0.996	3.0	1.004	3.4	1.004	3.6	1.004	NA	NA	3.5	0.996	2.4	0.996	NA	NA	
	26-avr	10-mai	4.4	1.001	2.1	0.998	2.9	0.998	2.9	0.996	3.5	1.002	3.0	0.998	3.2	1.002	NA	NA	10.2	0.996	7.8	0.996	NA	NA	

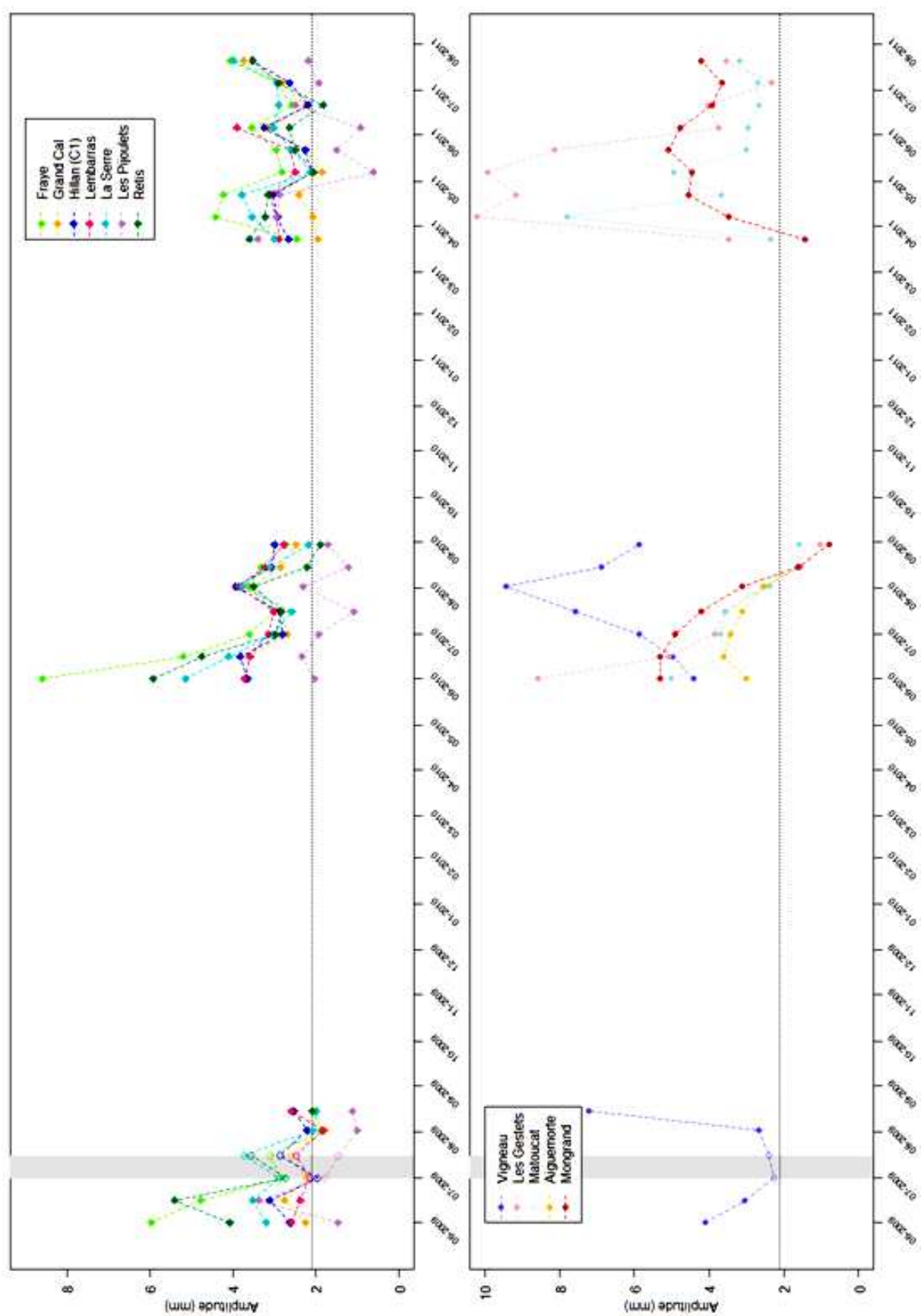


Figure V-5 : Amplitude des oscillations retrouvées pour la fréquence 1 cycle par jour à partir de l'analyse par transformées de Fourier du signal piézométrique pour les étiages 2009 à 2011, bassin versant du Bouron à gauche et du Tagon à droite. En pointillé la valeur seuil de précision de la mesure.

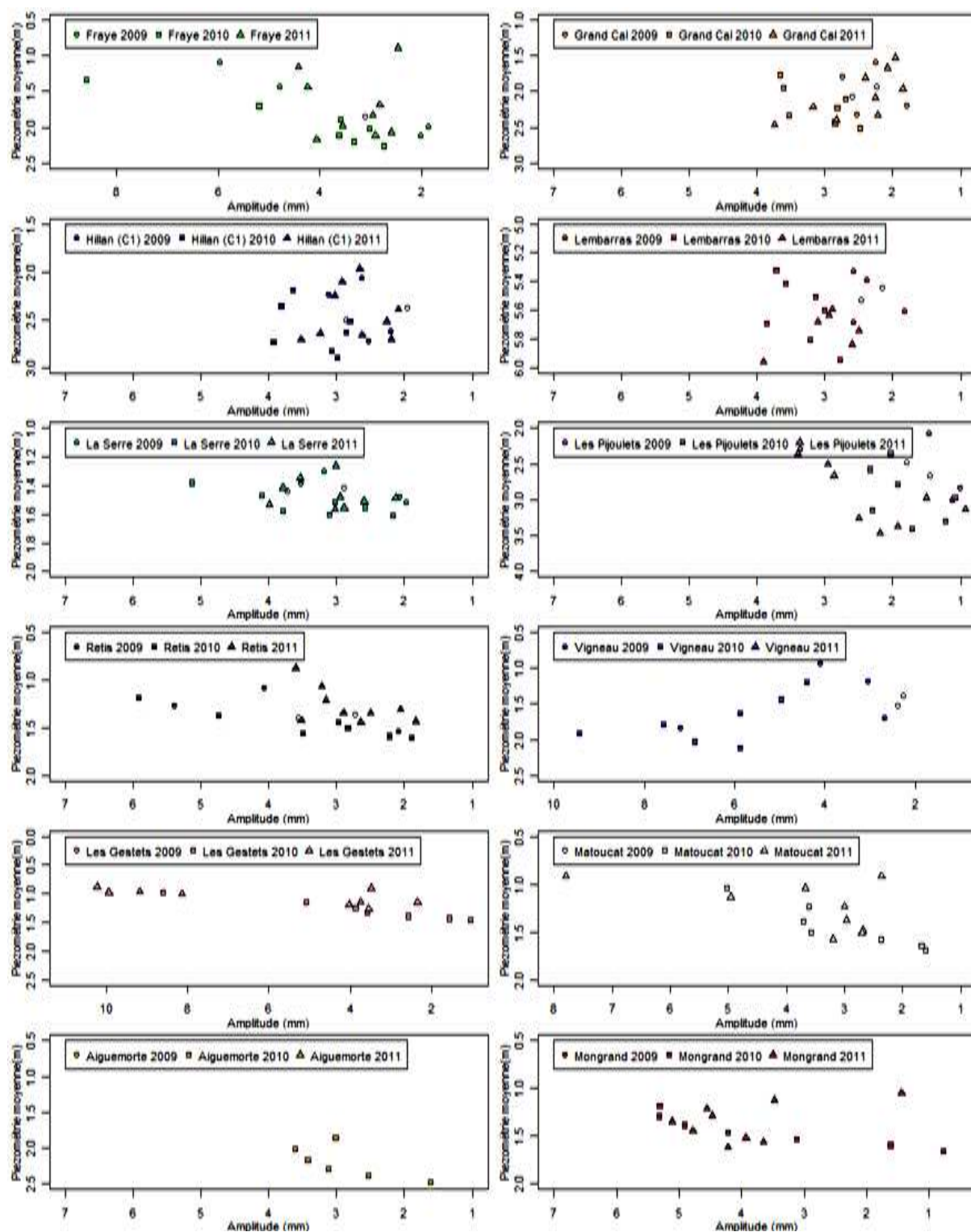


Figure V-6 : Amplitudes des oscillations en fonction de la profondeur de la nappe pour chaque site et chaque année étudiée.

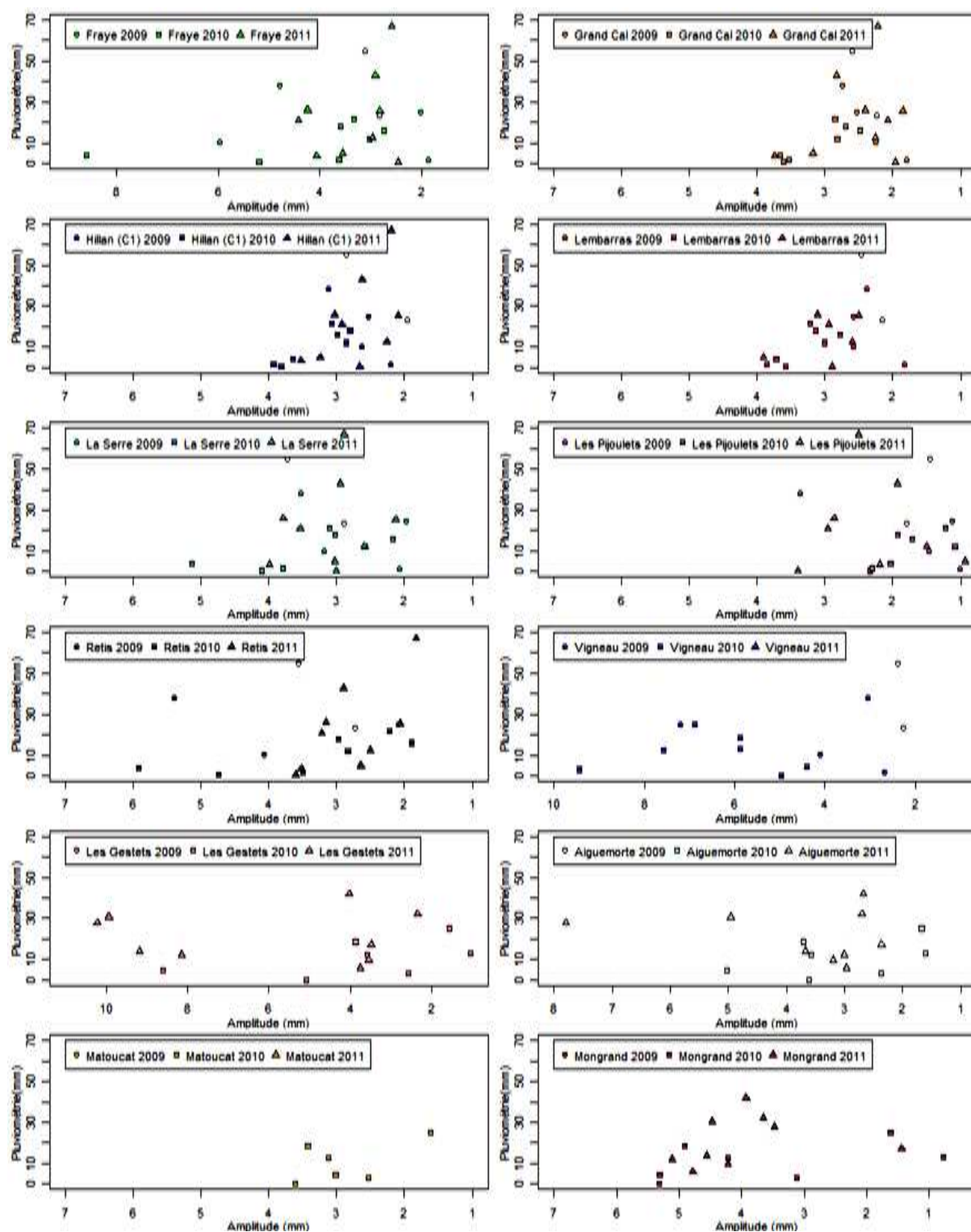


Figure V-7 : Amplitudes des oscillations en fonction de la pluviométrie cumulée sur la période (15 jours) pour chaque site et chaque année étudiée.

Le site de Mongrand présente un signal piézométrique moins perturbé par l'effet des pluies ce qui le rend plus interprétable que les autres. Contrairement au Bouron, l'amplitude augmente progressivement au début de la saison de croissance de la végétation, avec un léger fléchissement en mai, similaire au Bouron, mais la diminution des oscillations commence plus tôt que sur le Bouron, dès début juin.

Il ne semble pas y avoir de lien entre type de végétation et dynamique en amplitude des spectres pour les sites étudiés.

L'analyse de l'amplitude des oscillations en fonction de la profondeur de la nappe (Figure V-6) et de la pluie (Figure V-7) révèle un fonctionnement différent selon les sites. Pour certains sites, l'amplitude des oscillations est corrélée à la profondeur de la nappe. La corrélation est négative, i.e. l'amplitude diminue avec la profondeur de la nappe, faiblement significative pour Fraye (-0.48, p.value = 0.025), Retis (-0.46, p.value = 0.036), Matoucat (-0.67, p.value = 0.005), et très significative pour le site des Gestets (-0.80, p.value = 0.0002). La corrélation est positive, pour les raisons évoquées au paragraphe précédent, et faiblement significative au site de Vigneau (0.62, p.value = 0.023). Aucune corrélation significative avec la pluie n'a pu être mise en évidence.

5.3.1 Bilans hydriques

Tableau V-5 : Bilan hydrologique des bassins versants du Bouron et du Tagon. Les valeurs de P (précipitations cumulées en mm) et de débit (rapporté à 1m², en mm) correspondent aux valeurs cumulées sur la période considérée pour chaque piézomètre, comprise entre les crues de 2009 et de 2010.

		Date de la crue correspondante 2009-2010	Date de crue maximale 2010-2011	Durée de l'année hydrologique (jours)	Hauteur des Précipitations P (mm)	Débits Q (mm)	Différence ET (mm/j)
Bouron	Fraye	05/01/2010	24/12/2010	353	699.0	191	1.4
	Grand Cal	01/03/2010	25/12/2010	299	577.5	141	1.5
	Hillan (C1)	12/04/2010	27/12/2010	259	493.5	115	1.5
	Lembarras	22/07/2010	16/02/2011	209	457.5	99	1.7
	Les Serres	11/11/2009	21/11/2010	375	789.8	210	1.5
	Les Pijoulets	27/05/2010	26/01/2010	246	510.5	110	1.6
	Retis	04/12/2009	23/12/2010	384	793.0	222	1.5
Tagon	Aiguemorte	06/04/2010	29/12/2010	267	638.6	112	2.0
	Les Gestets	30/11/2009	23/12/2010	388	959.0	285	1.7
	Matoucat	07/12/2009	23/12/2010	381	911.1	257	1.7
	Mongrand	18/03/2010	24/12/2010	281	715.4	121	2.1
	Vigneau	09/04/2010	27/12/2010	262	641.1	107	2.0

Les valeurs obtenues par l'approche des bilans de masse s'échelonnent entre 1.4 et 2.1 mm.jour⁻¹(Tableau V-5). Le bassin versant du Tagon présente des ET supérieures à celles du

bassin versant du Bouron : en moyenne 1.9 mm.jour⁻¹ contre 1.5 mm.jour⁻¹, respectivement. A l'exception du site Les Serres, sur le bassin versant du Bouron, les sites plantés de Pin maritime semblent avoir une ET plus faible que les sites de feuillus. C'est aussi le cas sur le Tagon pour le site de Mongrand. Les sites de très faible densité ou de coupe rase (Les gestets, Matoucat) sont sensiblement identiques aux sites de Pin maritime sur ce bassin versant.

5.3.2 Comparaison entre ETR estimée par GRAECO et ET_g calculée à partir des oscillations diurnes de nappe

Les valeurs d'ET_g calculées à partir des oscillations diurnes de nappe sont toujours plus grandes que les valeurs d'ET habituellement admises pour la région. En moyenne sur les périodes pour lesquelles l'étude a été possible, les valeurs s'échelonnent entre 1.6 et 3.9 mm.jour⁻¹ (Tableau V-6).

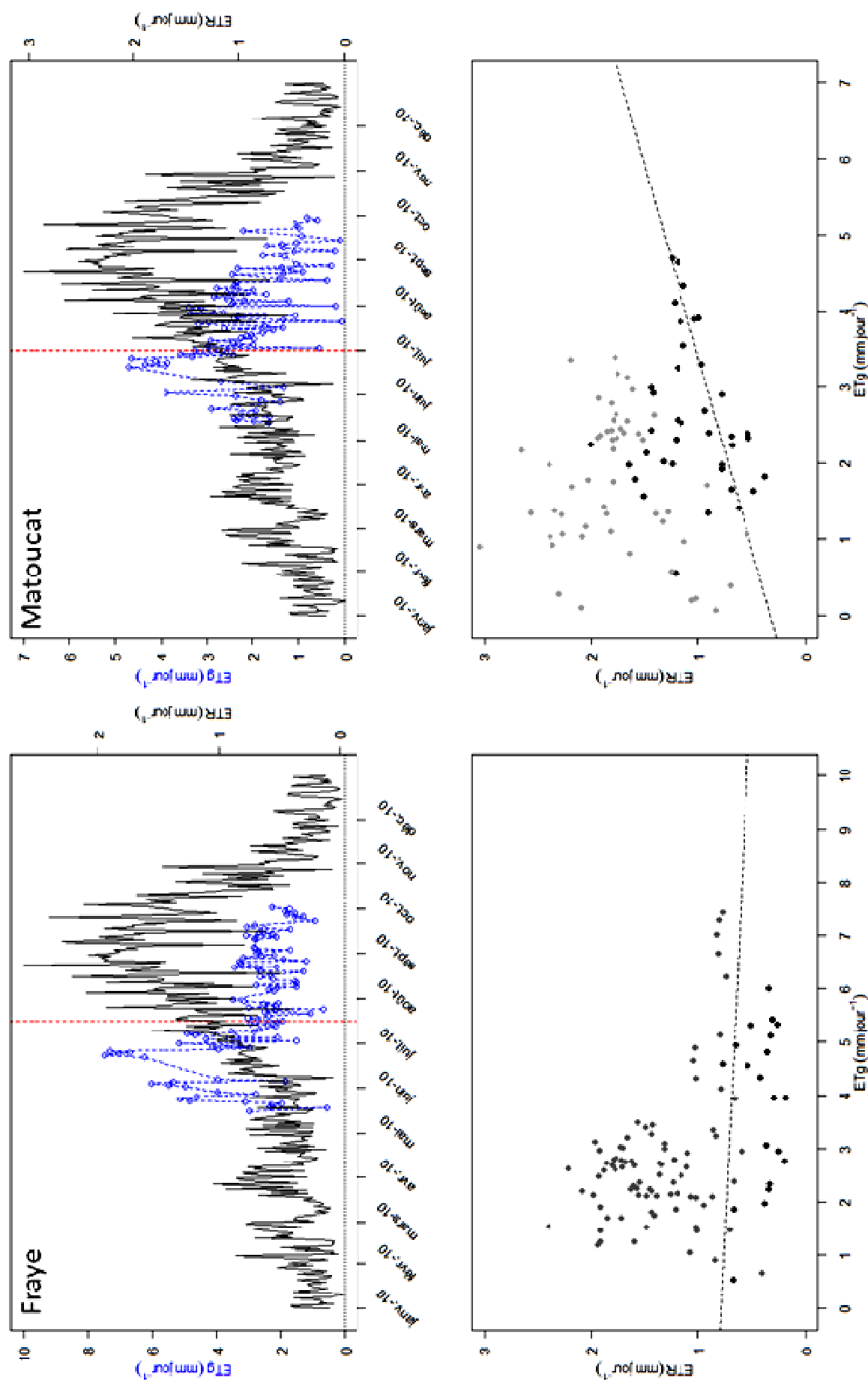
Tableau V-6 : ET_g moyenne sur la période de calcul (Début-Fin) pour tous les sites.

		Debut	Fin	Etg Moyenne (mm)
Bouron	Fraye	22/06/2009	02/10/2010	3.0
	Grand Cal	12/06/2009	08/10/2010	1.6
	Hillan C1	14/06/2009	28/10/2010	1.8
	Lembarras	14/06/2009	16/10/2010	2.3
	La Serre	20/05/2009	28/09/2010	2.7
	Les Pijoulets	20/05/2009	29/09/2010	3.2
	Retis	19/06/2009	01/10/2010	3.0
Tagon	Aiguemorte	13/05/2010	18/09/2010	1.6
	Les Gestets	13/05/2010	26/09/2010	2.8
	Matoucat	13/05/2010	26/09/2010	2.1
	Mongrand	08/05/2010	18/09/2010	2.2
	Vigneau	19/06/2009	01/10/2010	3.9

Pour les 6 sites plantés de Pin maritime, une comparaison a été possible avec le modèle GRAECO (Figure IV-8). Les valeurs d'ET_g journalières varient entre 0 et 10 mm, alors que les valeurs d'ETR estimées par le modèle GRAECO sont comprises entre 0 et 3 mm. En revanche, leur dynamique semble cohérente temporellement, en particulier pour les sites d'Hillan et de La Serre. Sur toute la période, la corrélation entre les variables ETR et ET_g est significative : 0.67 (p.value<0.001) pour le site de La Serre et 0.63 (p.value <0.001) pour Hillan.

La relation est plus complexe pour les autres sites. On observe une relation positive jusqu'à une date seuil au-delà de laquelle le relèvement dans la nappe se décorrèle de l'ETR estimée par le modèle GRAECO. Cette date est variable entre les sites. Pour le site de

Figure V-8 : Graphiques supérieurs : Comparaison de l'ETR calculée avec le modèle GRAECO et l'ETg estimée à partir des oscillations journalières de la nappe. La ligne verticale (en rouge) représente la date pour laquelle un décrochage entre ETR et ETg est observé. Graphiques inférieurs : relation ETR-ETg. Les points gris correspondent aux valeurs estimées après le décrochage.



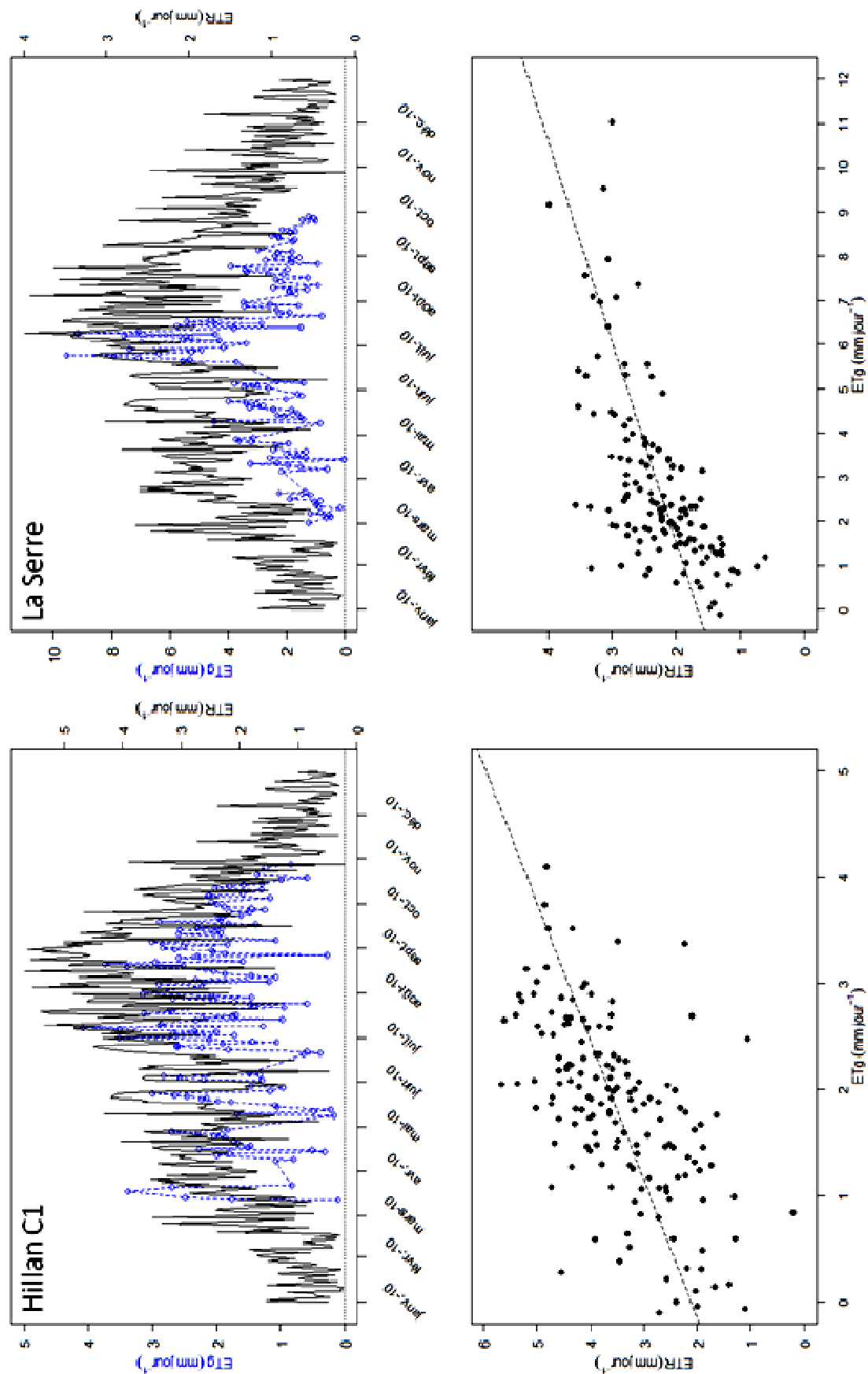
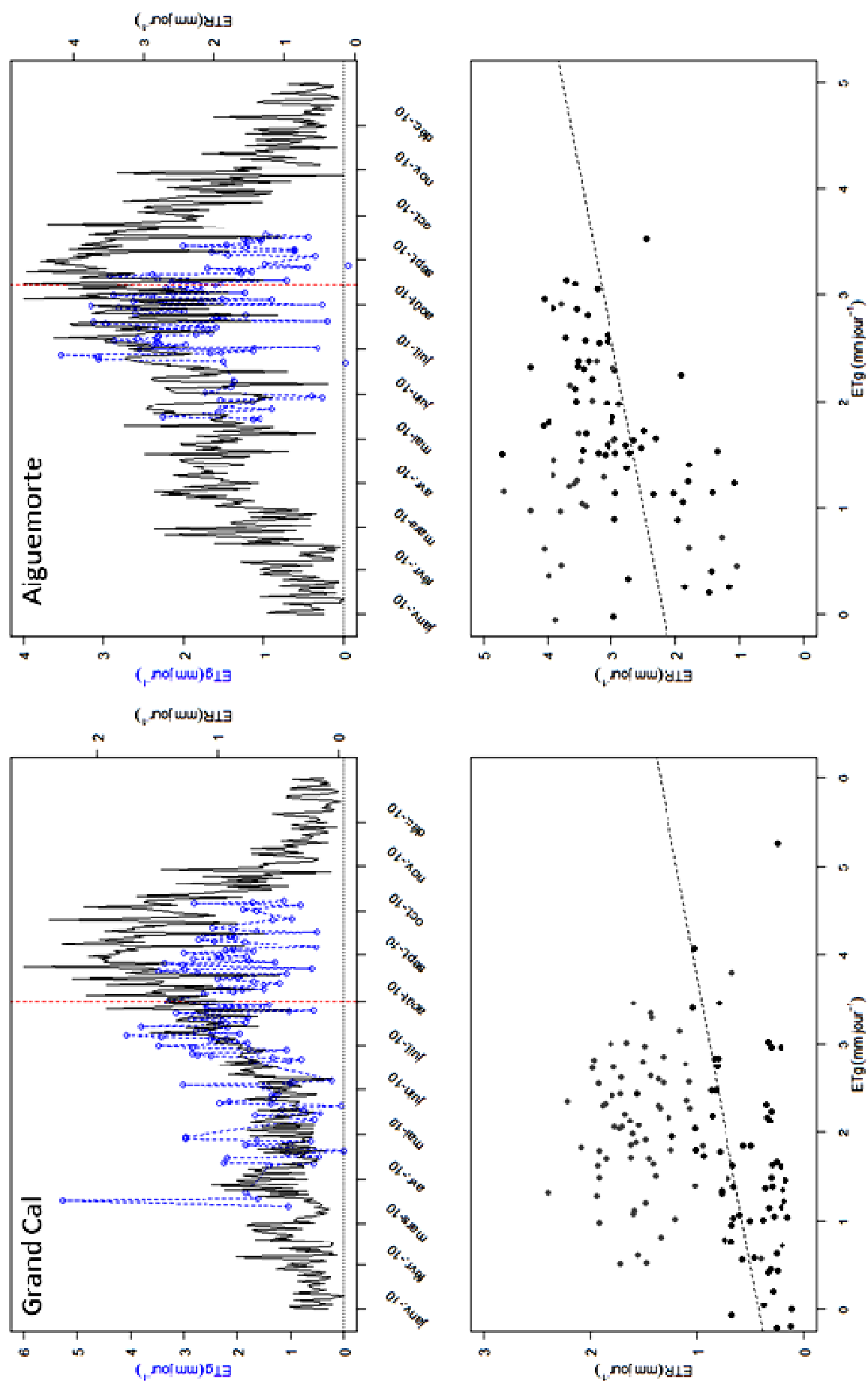


Figure V-8: Suite.

Figure V-8: Suite et fin.



Matoucat, avant le 1^{er} juillet, la corrélation entre ETR et ET_g est positive et significative ($r=0.78$, $p.value<0.001$). Après cette date, elle n'est plus du tout significative ($r=0.08$, $p.value = 0.52$). De même pour le site d'Aiguemorte, mais cette fois avant le 15 août, la corrélation entre ETR et ET_g est positive et significative ($r=0.46$, $p.value<0.01$). Après cette date, elle n'est quasiment plus significative ($r=0.32$, $p.value = 0.02$). Le site de GrandCal présente la même dynamique, avec un décrochage observé le 1^{er} août, une corrélation positive significative entre les deux variables auparavant ($r=0.51$, $p.value<0.001$), et aucune relation après cette date ($r=0.13$, $p.value = 0.37$). Le site de Fraye se distingue de tous les autres, en effet, la corrélation n'est jamais significative sur ce site.

5.4 Discussion

Il existe presque autant d'études sur les oscillations diurnes de la nappe que de capteurs utilisés : PS9800, Instrumentation Northwest (Engel et al., 2005), Mini-Troll, In-Situ Inc. (Butler et al., 2005 ; Schilling, 2007), Type-F, Steven (Gerla, 1992), WT-HR, TruTrack (Lautz, 2008), etc. La plupart ont une sensibilité identique à celle des capteurs utilisés pour cette étude (entre 1 et 3 mm de résolution, et de 0.05 à 0.1% d'erreur typique pleine échelle), et utilisent les mêmes méthodes pour corriger les données brutes (mesures manuelles de vérification, compensation de la pression atmosphérique, etc.). Cependant, la plupart de ces études mesurent des oscillations journalières de 1 à 15 cm (pour de l'Eucalyptus, en Argentine ; Engel et al., 2005), ce qui est bien supérieur à ce qui a pu être mesuré dans le cadre de cette étude.

Les oscillations journalières, i.e. pour la fréquence $1 \text{ cycle.jour}^{-1}$ sont nettement visibles pour presque tous les sites, sauf au site Les Pijoulets. Elles varient de 10.2 à 0.6 mm (en moyenne tous sites confondus: 3.4 mm). Les oscillations inférieures à 2.1 mm ne peuvent être considérées comme fiables, à cause de la résolution du capteur utilisé. Pour les sites au fonctionnement particulier (Pijoulets), un équipement plus sophistiqué et plus précis devrait être installé afin de vérifier les résultats de l'analyse de Fourier.

Interprétation des oscillations de nappe

Les facteurs susceptibles de provoquer le type d'oscillations diurnes dans les chroniques piézométriques telles que celles que nous observons sont (Griboski et al. 2010) : (1) la température, (2) les processus de gel-dégel, (3) l'effet des oscillations barométriques selon Rasmussen et Crawford (1997) (4) les prélèvements dus aux activités anthropiques, (5) les effets de marée, (6) les précipitations (7) le prélèvement des racines des plantes alimentant la transpiration de la végétation.

- (1) L'effet de la température peut être éliminé d'emblée : les changements de température sont faibles et varient très progressivement dans le temps, sans oscillation journalière. Czikowsky et Fitzjarrald (2004) ont montré que le changement de densité lié à la température dans les cours d'eau provoquait une variation de $4.8 \times 10^{-4} \text{ mm.jour}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, ce qui est pratiquement indétectable (Gribovszki et al., 2010). Turk (1975) montre que les oscillations diurnes dans la nappe, sur un plateau dont le premier horizon pédologique est une couche de sel de 85 cm d'épaisseur, sont attribuables à une fluctuation de température. Elles ne sont pas dues aux prélèvements par la végétation (qui est absente), et la signature temporelle des oscillations est très différente de celle couramment constatée dans le cas de nappes couplées à la végétation : le maximum a lieu vers 16h-18h, et le minimum a lieu en milieu de matinée. Ce cas est très particulier, et l'auteur reconnaît que si la nappe descend au delà de quelques centimètres sous la surface, les changements de température, qui expliquent les oscillations dans son expérimentation, ont peu de chance de se propager aussi

rapidement dans les sédiments, comme nos mesures le confirment. Il conclut que de tels effets thermiques sont indétectables dans le cas d'aquifères sableux ou graveleux.

- (2) De même, les processus de gel-dégel ne peuvent pas être invoqués, puisque le sol ne gèle jamais assez profondément pour atteindre la nappe.
- (3) Les oscillations barométriques peuvent être exclues à priori dans notre cas, puisque les valeurs mesurées sont des pressions absolues corrigées de la pression atmosphérique (Eq. 5.1), tel que le recommande Rasmussen et Crawford (1997). Si on ne peut pas définitivement exclure la possibilité de l'existence d'un délai entre un changement rapide de pression atmosphérique et la propagation de ce changement à travers la zone insaturée jusqu'à l'aquifère libre (Healy et Cook, 2002), il est négligeable dans les aquifères peu profonds (Meayboom, 1967) et est limité dans les forages de faible diamètre non celés (Loheide, 2008).
- (4) Les prélèvements dus aux activités anthropiques peuvent aussi être exclus dans notre cas, sauf dans le cas du site de Vigneau. Sur ce site, cependant, les prélèvements sont faibles (besoin d'une petite pépinière) et restent semblables à ceux de la végétation puisque la chronique ne présente pas d'oscillations métriques comme le piézomètre BRGM de Canauley (voir Chapitre II). Comme illustré dans le chapitre II (Figure II-13), un pompage sur la nappe plio-quaternaire est visible et provoque des oscillations journalières, de l'ordre du mètre, bien visibles. La plupart des sites de cette étude sont situés en pleine forêt. Le site Les Serres est situé à proximité d'un champ de maïs irrigué mais il n'apparaît pas, sur les courbes piézométriques, que ce voisinage ait des conséquences sur le niveau de la nappe. En effet, la dynamique de la chronique de ce site est sensiblement identique à celle du site de Retis, voisin (chapitre II, Figure II-12). Il est probable que le pivot situé à proximité du site Les Serres pompe dans une nappe plus profonde que celle qui nous intéresse ici.
- (5) Les effets de marée ne sont pas pertinents dans le cas du site du Bouron. Saint-Pé (1966) a déterminé que la distance d'influence de la marée sur la nappe ne se fait ressentir qu'à faible distance (l'amplitude à 80 m de la côte est de 1 cm), or, l'exutoire du bassin versant du Tagon se trouve à 1.5 km environ de la côte.
- (6) L'effet immédiat des précipitations est net et peut être distingué sans ambiguïté : il provoque une remontée rapide de la hauteur de nappe, particulièrement visible en hiver, c'est pourquoi ces jours ont été retirés de l'analyse pour le calcul d' ET_g .
- (7) Par conséquent, la cause principale des oscillations journalières du toit de la nappe semblent être attribuables aux prélèvements de la végétation. Une première analyse de ces spectres révèle que le signal retranscrit bien sur le site du Bouron, les périodes de sécheresse observées par ailleurs. La concordance entre périodes de moindre amplitude des oscillations et périodes de sécheresse caractérisées par les mesures continues de profils d'eau du sol du site de Bilos est nette (Moreaux et al., 2011, et pour l'année 2011, Moreaux, communication personnelle).

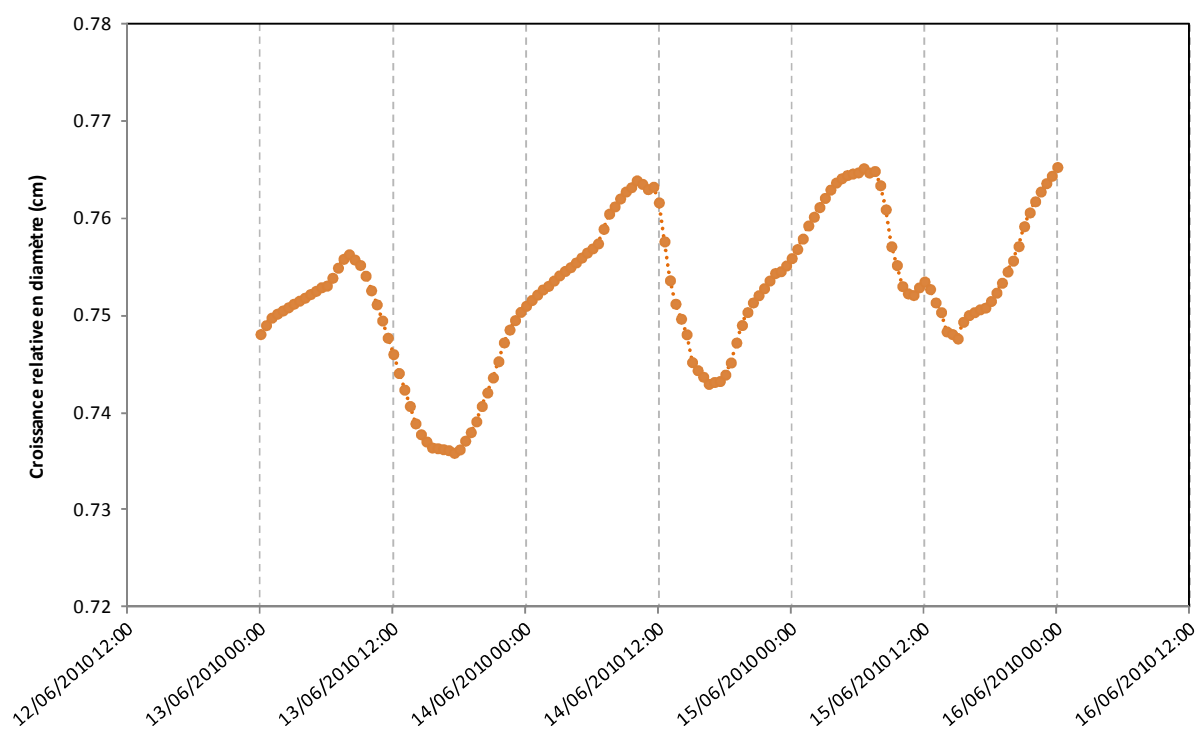


Figure V-9 : Exemple des variations du diamètre lors de belles journées en juin 2010 pour le Pin maritime (site de Bilos, Source : V. Moreaux)

A l'issue de ces constatations et compte tenu de leur cinétique, les oscillations journalières du toit de la nappe telles que nous les avons observées peuvent être définitivement rattachées aux sels prélèvements par la végétation. Les différents types de végétation, en particulier feuillus versus conifères, ne semblent pas se différencier du point de vue de l'amplitude des oscillations. Butler et al. (2007) avaient remarqué que l'amplitude dépendait du type, de la densité et de la taille de la végétation. Nos piézomètres sont situés sous des couverts forestiers matures, par conséquent, il n'a pas été possible de comparer nos résultats avec des sites complètement dépourvus de végétation, comme dans les autres études (White, 1932 ; Schilling, 2007 ; Engel et al., 2005).

Amplitude des oscillations

Trois facteurs peuvent influencer l'amplitude des oscillations : l'évapotranspiration, la disponibilité en eau de la zone non saturée, qui est rechargée par les précipitations et couvre une partie plus ou moins importante des besoins de transpiration, et la profondeur de la nappe relativement à celle du système racinaire.

Aucun des sites n'a présenté de corrélation entre amplitude des oscillations et quantité des précipitations de la période. Cette variable donne une bonne indication du contenu en eau de zone vadose : l'indice des précipitations antérieures (Chevallier, 1983) reproduit en effet de façon assez précise la dynamique de l'humidité du sol sur le site du Bray (Annexe B). Engel et al. (2005) ont observé des comportements de phréatophytes opportunistes/facultatifs pour des Eucalyptus, avec une tendance à des oscillations plus fortes lorsque le contenu en eau de la zone non saturée diminuait. Ce comportement s'explique par l'accroissement de la fraction prélevée directement dans la nappe aux dépens du prélèvement dans la zone vadose quand la disponibilité en eau de celle-ci diminue. Dans notre cas, nos données ne permettent pas de trancher sur cette question, faute de mesures conjointes de l'humidité du sol aux sites étudiés.

Sur certains sites, l'amplitude diminue avec la profondeur de la nappe. Ce phénomène a déjà été observé par d'autres études, avec la caractérisation d'un seuil d'extinction (Shah, et al., 2007) à partir duquel la profondeur de la nappe dépasse la profondeur des racines et au delà de laquelle il y a rupture des filets capillaires. A partir de ce seuil, il y a disjonction totale entre comportement de la végétation et comportement de la nappe, ce qui manifeste l'arrêt du prélèvement racinaire direct dans la nappe. C'est bien la situation observée sur les deux bassins versants Tagon et Bouron : le décrochage entre les fluctuations journalières de la nappe et l'évapotranspiration est d'autant plus précoce (début juillet) que les sols et probablement les racines sont superficiels (Fraye et Matoucat).

Estimation de l'ET et du prélèvement dans la nappe par la végétation

Le calcul de l'ET à partir du bilan hydrique donne des résultats dans la gamme des valeurs traditionnellement trouvées en moyenne annuelle, dans la littérature pour un couvert fermé de Pin maritime : 2.16 mm.j^{-1} (Loustau et al., 1999), 1.70 à 1.82 mm.j^{-1} (Berbigier et

al., 2001), 1.84 à 2.11 mm.j⁻¹ (Moreaux et al., 2011). Pour une coupe rase ou un très jeune peuplement en revanche, l'ET moyenne annuelle est réduite à 0.98mm.j⁻¹ en réponse à une diminution du rayonnement net disponible (Kowalski et al., 2003). Les valeurs d'ET estimées par bilan de masse sur nos sites, 1.6 à 1.84 mm⁻¹ (Bouron) et 1.6 à 1.97 mm.j⁻¹ (Tagon) sont cohérentes avec les valeurs précédentes, établies pourtant sur des footprints d'un à deux ordres de grandeur inférieurs. Elles ont dans la gamme inférieure pour le bassin, ce qui pourrait être lié au fait que 8.2 % et 17.2 % des surfaces totales des bassins versants du Bouron et du Tagon respectivement ne sont pas couvertes par des forêts de Pin maritime. L'ET semble plus importante sur le Tagon. Cette particularité peut être due à la nappe plus superficielle, donc plus accessible sur l'ensemble du bassin versant ce qui atténuerait l'impact négatif sur ET des épisodes de sécheresse. Il peut s'expliquer aussi par une distribution en classes d'âge de moyenne plus élevée (post tempête 2009) et par la dégradation des peuplements par les chablis de la même tempête, un effet de ce type ayant été observé suite à la tempête de 1999 pour le bassin versant du Tagon (Loustau et Guillot, 2009). Cependant, l'hypothèse d'une sous-estimation du débit du Tagon ne peut être totalement éliminée. Il est, en effet, tout à fait possible que la courbe de tarage ait été modifiée depuis 2004, par remaniement du lit de la rivière, ce qui conduit à une sous-estimation des flux d'eau pour les données contemporaines. Pour reprendre les termes de Cosandey et Robinson (2007) : une "courbe de tarage est à la fois très délicate à construire et jamais définitive". Le suivi pendant 2 ans ne permet pas de statuer sur ce point et l'effort de production d'une courbe de tarage récente, qui n'a pu qu'être entamée entre 2009 et 2010, devra être poursuivi afin de vérifier la validité des mesures de débit depuis 2009.

Afin de retrouver les variations journalières des oscillations diurnes de la nappe, l'ET_g a été calculée pour l'été 2010. La méthodologie traditionnellement appliquée est celle de White (1932), qui considère que les prélèvements journaliers dans la nappe peuvent être estimés par :

$$Prelevements = S * (24 * r + \Delta s) \quad (Eq. 5.9)$$

avec S ([-]) la porosité efficace de l'aquifère, r la recharge nocturne (L.T⁻¹) à la courbe piézométrique entre minuit et 4h du matin, et Δs ([L]) la différence de niveau sur une période de 24h. Cette méthode a été conçue pour des milieux où l'évapotranspiration constituait l'unique décharge du système (fond de vallée encaissée sans exutoire). Deux hypothèses fortes découlent de cette formulation : (1) les prélèvements sont nuls entre minuit et 4h du matin, (2) la recharge est constante durant la journée, (3) la porosité efficace est connue (Loheide et al., 2005). De nombreux auteurs ont depuis appliqué cette méthode sans la modifier (Bond et al., 2007 ; Butler et al., 2007 ; Lautz, 2008, Loheide et al., 2005, Shah et al., 2007). Gatewood et al. (1950) ont pourtant démontré que la première hypothèse n'était pas correcte dans le cas du Cèdre, puisque la transpiration nocturne n'était pas nulle. Des études récentes ont montré que lors de belles journées, l'ETR nocturne, mesurée par la méthode des flux turbulents sur une

parcelle de Pin maritime n'était pas toujours nulle et des enregistrements des variations micrométriques de diamètre des troncs ont montré un gonflement des troncs durant la nuit (Figure V-9), lié à un restockage d'eau qui s'accompagne nécessairement d'un prélèvement nocturne mis en évidence par ailleurs (Loustau et al. 1996, 1998). Les hypothèses inhérentes à la méthode de calcul de White ne sont donc pas vérifiées dans notre cas. Dans un système hydrologique tel que celui rencontré dans les landes, la vidange est assurée par écrêtage de la nappe dans le réseau hydrologique de surface (drains et cours d'eau).

L'étude de Schilling (2007) dont nous avons repris et adapté la méthode est la seule étude rencontrée dans la bibliographie qui présente le même type de relation hydraulique entre la rivière et la nappe (Schilling et al., 2004). En effet, l'incision provoquée dans la plaine par le réseau hydrographique de surface provoque une diminution de la nappe à proximité des cours d'eau, tout comme dans les Landes, c'est pourquoi cette méthode a été préférée dans le cadre de cette étude.

De plus Schilling (2007) est la première à utiliser la dynamique journalière au lieu de la dynamique nocturne, ce qui permet de ne faire aucune hypothèse sur la recharge nocturne. En effet, la recharge n'est pas nécessairement constante ni illimitée : dans la méthode de White, la recharge journalière est considérée comme linéaire et identique au taux de recharge ayant eu lieu entre minuit et 4h. Si la recharge correspond à une remise à l'équilibre des charges hydrauliques du système localement déprimé, la recharge peut plafonner au lieu d'augmenter linéairement. D'autres études ont remis en cause l'hypothèse (3) de la méthode de White (Loheide et al., 2005 ; Loheide, 2008 ; Gribovski et al., 2008). En effet, ces études ont démontré que la porosité efficace pouvait varier le long du profil et ont défini une valeur de porosité relative, S^* . Sa valeur ne dépend pas seulement des propriétés poreuses du milieu, mais aussi de la profondeur de la nappe, de la durée du drainage, et des conditions au pas de temps précédent, e.g. d'humidité de la zone non saturée (Loheide et al., 2005).

L'introduction de la courbe de vidange de la nappe, qui dépend de la charge hydraulique à l'instant considéré et de la durée de l'étiage, introduit un terme de variation qui pourrait être équivalent. En effet, dans son analyse Schilling (2007) montre que la pente nocturne sous couvert herbacé est équivalente à la pente des maxima journaliers sous couvert forestier. Tschinkel a introduit en 1963 la notion de courbe de tarissement potentielle, due uniquement au drainage, et la courbe de tarissement réalisée, due à la combinaison des prélèvements de la végétation et du drainage. Mais la méthode d'ajustement de la courbe de tarissement potentielle basée sur les pics (y compris ceux dus à une recharge pluviométrique) paraît peu satisfaisante. Engel et al. (2005) sont les premiers à prendre en compte un terme additionnel *ref* pour retirer la dynamique régionale de la nappe, mais il avait à disposition un site où les oscillations de nappes étaient nulles pendant la saison de végétation, leur permettant de faire l'hypothèse que la décharge à ce site correspondait à une décharge non influencée par les prélèvements. Loheide (2008) enlève la tendance de façon linéaire sur la chronique piézométrique avant de procéder au calcul des prélèvements journaliers. La prise en compte de la courbe de tarissement potentielle sur l'ensemble de la période étudiée est à notre avis une méthode beaucoup plus puissante pour retirer les effets liés à la vidange de nappe

régionale, à condition de bien faire attention aux effets de bords, c'est-à-dire, de bien vérifier que la courbe ne diverge pas aux limites de son domaine d'ajustement. Nous avons considéré que cette courbe de tarissement pouvait être estimée sur l'ensemble d'une période d'étiage par la dérivée de la profondeur de la nappe en fonction du temps. Cette hypothèse suppose que le prélèvement peut être négligé devant le drainage naturel de la nappe ce qui n'est pas systématiquement vérifié ici. Elle a pu conduire à des erreurs importantes pour les journées où les résidus à la courbe ajustée prennent des valeurs élevées.

Les résultats de la comparaison entre ETR estimée à l'aide du modèle GRAECO et ET_g estimée à partir des oscillations diurnes de la nappe montrent que les valeurs d' ET_g estimées sont globalement dans la gamme des valeurs d'ETR de peuplements de Pin maritime pour les différentes périodes considérées, le plus souvent au printemps et en été. Ce constat n'est pas vérifié par d'autres études similaires. Par exemple, Vincke et Thiry (2008) mesurent des transpirations de 0 à 2 mm.jour⁻¹ avec la méthode des flux de sève, et calculent des ET_g de 0 à 8 mm.jour⁻¹. Dans leur étude, Martinet et al. (2009) montrent que l' ET_g représente 57.35 % à 254.34% de l' ET mesurée à partir de mesures de flux turbulents. Dans tous les cas, ces deux variables semblent fonctionnellement liées. Dans un système comme celui des Landes de Gascogne, les relations entre végétation et nappe ne sont pas triviales. Certains sites, comme Hillan ou La Serre montrent une bonne corrélation de l'ETR avec les oscillations de nappe durant toute la période de croissance. Dans le cas du site de la Serre, la présence d'une lentille argileuse proche de la surface peut expliquer la faible gamme de variation piézométrique pendant la période d'étiage, qui reste toujours très superficielle (0-1.64 m). Pour tous les autres sites, la relation entre ETR et ET_g est significative jusqu'à une certaine date, qui correspond au début de la diminution des oscillations dans la nappe. Nous interprétons cette diminution comme un seuil de profondeur au-delà duquel la nappe devient fonctionnellement hors d'atteinte du système racinaire. Le système racinaire du Pin maritime est en effet constitué d'un réseau de racines traçantes en surface, avec une décroissance exponentielle en profondeur (Dupuy et al., 2005 ; Danjon et al., 1999). Il en va de même pour le sous-bois à enracinement généralement plus faible, même si Bakker et al (2006) ont montré que les racines de cette végétation basse pouvaient atteindre des profondeurs aussi importantes que celles des pins. Toutefois, cette décroissance des oscillations de la nappe et l'extinction complète du signal que nous observons pour ces sites résultent aussi de la combinaison de plusieurs facteurs. Remarquons que ce fonctionnement est assez cohérent avec les conclusions du chapitre III qui démontrent le rôle joué par le régime de la nappe phréatique dans la croissance secondaire des arbres.

La profondeur de la ressource "zone saturée" est déterminante : plus elle est importante, plus le continuum sol-plante-atmosphère est long, et plus la résistance hydraulique est forte pour le transport de l'eau.

La diminution de la transpiration observée en cas de stress hydrique ne semble pas devoir jouer un rôle important d'après le modèle GRAECO. Cependant les dates de

décorrélation entre ETR et ET_g correspondent souvent au milieu de l'été, période où le stress hydrique commence à devenir important (Loustau et al., 1990). A cette période, les pins régulent déjà fortement leur transpiration, tandis que, par exemple, un sous-bois de Molinie, espèce herbacée annuelle à rhizome, maintient une transpiration importante durant toute sa saison végétative (Berbigier et al., 1991). Il peut d'ailleurs être signalé que cette diminution des prélèvements dans la nappe coïncide avec la dynamique phénologique de la Molinie : maximum de biomasse aérienne en juin, puis déclin à partir du mois d'août (Delzon, 2000). D'autres études ont déjà montré le lien étroit entre phénologie et oscillations diurnes dans la nappe : elles deviennent visibles à partir du début de la saison de croissance (Butler et al., 2007) et s'arrêtent avec les premières périodes de gel importantes (Lautz, 2008). Par ailleurs, Martinet et al. (2009) ont démontré que la suppression de la végétation du sous-bois entraîne une réduction significative de l'amplitude des oscillations journalières dans la nappe de 19 à 21 %.

La présence de facteurs morphologiques du sol limitant l'exploration des racines, tels que l'alias, peut aussi expliquer la variabilité des réponses entre les sites. Les comptes-rendus de forages trop succincts disponibles pour notre étude ne permettent pas de mettre en évidence une relation nette entre profondeur au moment du découplage ETR- ET_g et profondeur de l'alias. A noter tout de même que sur tous les sites, ce décrochement se produit pour une profondeur proche ou dans la gamme des profondeurs d'alias notées lors des forages (Grand Cal : alias à 2 m maximum, versus nappe à 2.25 m, Matoucat : alias à 2 m max, versus nappe à 1.25 m, Aiguemorte : alias à 3.5 m max, versus nappe à 2.25 m, voir table 2.3). La profondeur de la nappe au site de La Serre ne descend pas en dessous de 1.7 m alors que la profondeur maximale de l'alias est de 2m, ce qui pourrait expliquer en partie le fait que sur ce site, il n'y a jamais de décorrélation entre ETR et ET_g . Ce phénomène avait déjà été montré dans le cas du site du Bray (Figure V-1).

Enfin, la proximité au réseau de drainage joue très certainement un rôle déterminant. Dans le cas du site de Fraye, la dynamique de la température de la nappe est très liée avec la dynamique des débits du Bouron. La forte connectivité hydraulique entre rivière et nappe localement pourrait être le facteur déterminant des variations du niveau de nappe et expliquer l'absence de corrélation entre ETR et ET_g . Zhu et al. (2011), dans une étude comparant les mesures d'ET par eddy-correlation et l' ET_g calculée à partir des oscillations de la nappe, ont montré que la dynamique temporelle des piézomètres à proximité de la rivière Colorado (USA) dépend à la fois de l'ET et des changements de niveau dans la rivière.

5.5 Conclusion

Nous montrons que pour l'essentiel les oscillations journalières observées dans la nappe sont bien dues aux prélèvements par la végétation. Trois méthodes différentes ont été testées qui renseignent toutes sur un aspect des prélèvements par la végétation : le bilan hydrique renseigne sur le fonctionnement global du système, l'analyse par transformée de Fourier renseigne sur la dynamique pendant la période de croissance de la végétation, tandis que l'étude des oscillations diurnes de nappe renseigne sur la dynamique journalière des prélèvements. Le Tableau V-7 donne les valeurs moyennes observées selon les différentes méthodes. Bien que ces méthodes ne soient pas directement comparables, en particulier en raison de la fenêtre temporelle différente, elles sont complémentaires. Les valeurs données par toutes les méthodes sont relativement comparables, sauf pour la méthode des oscillations diurnes de nappe. En règle générale, les valeurs sont plus importantes pour le bassin versant du Tagon et du Bouron. Des analyses complémentaires devront être réalisées pour valider la méthode des oscillations diurnes de nappe.

Tableau V-7 : Bilan des ET calculées selon les différentes méthodes (mm). La valeur correspond à la valeur moyenne sur la période de mesure. Pour l'ETg Fourier, les amplitudes brutes ont été multipliées par la valeur de porosité effective.

	Tagon	Bouron
ET Bilan hydrique	1.9	1.5
ETg Fourier	0.9	0.7
ETg Oscillations diurnes	2.5	2.5
ETR GRAECO	1.4	1.7

La relation entre ETR et ET_g n'est pas directe, et un grand nombre de facteurs semble rentrer en ligne de compte, cependant le Pin maritime utilise pendant une grande partie de la saison de croissance la ressource en eau de la zone saturée. Cependant, sous réserve d'amélioration, du calcul de l' ET_g , le prélèvement tel que nous l'estimons ici ne semble pas pouvoir servir de proxy simple pour l'ETR, car elle semble surestimer les prélèvements dans la nappe. De plus, pour certains sites, les deux variables se décorrèlent progressivement au cours de la saison de croissance et au fur et à mesure que la nappe devient profonde. Relativement aux travaux antérieurs, les observations à haute résolution temporelle que nous avons effectuées montrent que ce prélèvement se poursuit dans certains sites jusqu'à une profondeur de 2m et au delà. En revanche, l' ET_g est une variable qui quantifie l'utilisation de la nappe par le Pin maritime et nous démontrons ici que ce prélèvement couvre une grande partie des besoins de la végétation au cours de la saison de croissance. Elle permet ainsi de mieux appréhender leur susceptibilité à la modification du niveau de nappe induite par des facteurs anthropiques ou par la modification du régime hydrologique liée au changement climatique. Cependant, cette relation n'est pas directe et devra être affinée, notamment parce

que le calcul de l' ET_g tel que nous l'avons mis en œuvre repose sur des hypothèses qui ne sont pas toujours vérifiées.

Ce qui a pu être prouvé pour le Pin maritime est valable pour les autres espèces de la région : les oscillations ont aussi été montrées pour des sites possédant des couverts de type feuillu. Malheureusement peu d'études ont été réalisées sur ces espèces dans la région. Ceci s'explique simplement par le fait que le Pin maritime est la principale essence forestière du Massif Landais. Malgré tout, il semble important de s'intéresser davantage à l'avenir aux forêts de feuillus, car les derniers inventaires forestiers sur le Massif ont montré une constante progression de ce type de couvert : 5397 milliers de m^3 en 1978 à 9834 milliers de m^3 en 2009 pour les chênes, et 2569 milliers de m^3 en 1978 à 5032 milliers de m^3 en 2009 pour les autres feuillus. De plus, des études sur les chênes dans d'autres régions ont montré que le système racinaire de ce genre est profond (jusqu'à plus de 4 m ; Lucot et Bruckert, 1992) et sur le site de Lembarras, situé dans un arial (feuillu), des oscillations sont visibles à plus de 5 mètres de profondeur. Certaines espèces de chênes présentent des adaptations très spécifiques, comme par exemple la redistribution de l'eau par exsudats racinaires le long du profil racinaire (phénomène de redistribution hydraulique, Nadezhdina, 2008). Il semble y avoir une tendance à l'échelle du Massif pour l'installation volontaire ou du moins la préservation des espèces feuillues, afin de favoriser la biodiversité et réduire la pression exercée par certains ravageurs sur les peuplements de Pin maritime (Chenille processionnaire, *Thaumetopoea pityocampa* ; Dulaurent, 2011). Il semble donc important d'en apprendre davantage sur le bilan hydrique de ces peuplements feuillus, leur profondeur d'enracinement, etc. afin de pouvoir intégrer le fonctionnement de ces types de couverts à l'échelle de bassin versant. Il en va de même pour des espèces du genre *Eucalyptus* dont l'introduction est envisagée et qui sont dotées d'un enracinement profond et puissant.

Nous démontrons donc à l'échelle subrégionale le rôle majeur de la nappe plio-quaternaire pour le stockage et l'alimentation en eau des arbres dans les Landes, confirmant ainsi la nécessité d'approches couplées nappe-végétation pour la compréhension et la prédiction de l'hydrologie de surface d'une part et du fonctionnement des forêts d'autre part. Les modifications du régime hydrique dues à des changements de couverts, e.g. un rajeunissement après une tempête, ou dues à des différences de composition de l'occupation du sol, e.g. bassin versant mixte agricole et forestier versus bassin versant uniquement forestier, pourraient être en grande partie liées à des différences d'infiltration, d'interception et de recharge de la nappe induite par le couvert végétal plus qu'à des prélèvements de la végétation directement dans la nappe. Cet aspect est abordé par une étude de sensibilité, conduite à l'aide d'un modèle hydrogéologique distribué, au prochain chapitre.

Chapitre VI

Modélisation hydrologique spatialisée : cas du bassin versant du Bouron. Etude de sensibilité aux types de couverts

*" J'ai besoin d'un mouton. Dessine-moi un mouton.
Alors j'ai dessiné. Il regarda attentivement, puis :
- Non ! Celui-là est déjà très malade. Fais-en un autre.
Je dessinai. Mon ami sourit gentiment, avec indulgence :
- Tu vois bien... Ce n'est pas un mouton, c'est un bélier. Il a des cornes...
Je refis donc encore mon dessin, mais il fut refusé, comme les précédents :
- Celui-là est trop vieux. Je veux un mouton qui vive longtemps.
Alors faute de patience, comme j'avais hâte de commencer le démontage
de mon moteur, je griffonnai ce dessin-ci, et je lançai :
- Ça c'est la caisse. Le mouton que tu veux est dedans.
Mais je fus bien surpris de voir s'illuminer le visage de mon jeune juge :
- C'est tout à fait ce que je voulais !"
St Exupéry, A., *Le Petit Prince*, 1943.*

VI. Table des matières

6.1	Introduction.....	205
6.2	Matériel et Méthode	209
6.2.1	Mesures et données utilisées.....	209
6.3	Propriétés du système hydrogéologique étudié	211
6.3.1	L'aquifère plio-quaternaire du bassin versant du Bouron	211
6.3.1.1	Côte et nature du substratum	211
6.3.1.1	Type de formation aquifère.....	213
6.3.1.2	Epaisseur de la formation aquifère	219
6.3.2	Conditions aux limites hydrodynamiques de l'aquifère.....	219
6.3.2.1	Cartes piézométriques pour l'année hydrologique 2009-2010	219
6.3.2.1	Limites du bassin versant hydrogéologique	221
6.3.2.1	Dynamique piézométrique aux sites observés.....	225
6.3.2.2	Connexion nappe/rivière.....	225
6.3.3	En résumé.....	230
6.4	Géométrie et conditions aux limites	231
6.4.1	Géométrie de l'aquifère modélisé.....	231
6.4.2	Calcul de la recharge	231
6.4.3	Autres conditions aux limites	233
6.4.4	Exploitation des résultats	235
6.5	Modélisation en régime permanent	237
6.6	Modélisation en régime transitoire.....	240
6.6.1	De long terme, 10 ans au pas de temps mensuel	240
6.6.2	De court terme, 2 ans au pas de temps journalier.....	245
6.7	Discussion et conclusion.....	252

6.1 Introduction

L'intérêt grandissant pour la compréhension du système aquifère-végétation dans son intégralité va de pair avec les inquiétudes héritées des événements climatiques extrêmes (ECE), comme les sécheresses ou les tempêtes. Huntington et al. (2009) notent ainsi que les sécheresses seront plus fréquentes à l'avenir au Nord des Etats-Unis, impliquant des risques d'incendie plus importants, une réduction de la productivité de la forêt, et des aménités (en particulier, des critères esthétiques tels que la moindre coloration des forêts à l'automne). Par ailleurs, de nombreux articles traitent de l'effet des changements de couverts sur le bilan hydrique de bassins versants, soit suite à l'exploitation des forêts pour la production de bois (voir chapitre I) soit résultant de dégâts consécutifs à une tempête (Badoux et al., 2006).

La comparaison des débits spécifiques journaliers avant et après la tempête de 1999 pour les bassins versants du Bouron et du Tagon, a révélé que le fonctionnement hydrologique du Tagon a été significativement modifié après le passage de la tempête par rapport au bassin versant témoin, le Bouron (Guillot et al., 2010). Bien que la pluviométrie soit très peu différente entre les deux bassins versants étudiés : en moyenne, un écart de 12.6 mm par an entre 1996 et 2005 (au maximum 15.7 mm pour l'année 2000), le débit spécifique du Bouron est inférieur à celui du Tagon en période de crue (jusqu'à 12 l/s/km² de plus). Après la tempête Martin de 1999, la différence s'est accentuée : les débits du Tagon peuvent atteindre jusqu'à 26 l/s/km² de plus que le ruisseau du Bouron toutes choses égales par ailleurs (Figure VI-1).

Deux principaux facteurs peuvent être mis en cause : la modification du type de couvert, avec une diminution de l'interception et de l'évapotranspiration ou, la modification des conditions de surface résultant des travaux forestiers de nettoyage des parcelles endommagées et de mise en place des nouveaux peuplements (labour, organisation progressive des horizons de surface, etc.). L'âge des peuplements modifie le bilan hydrique de façon notable (Kuczera, 1987 ; Vertessy et al., 2001 ; Song et Woodcock, 2003 ; Song et al., 2007). Ainsi, un site de coupe rase produirait jusqu'à deux fois plus de recharge potentielle qu'un peuplement de 28 ans (Kowalski et al., 2003). Cependant, la diminution de la recharge n'est pas nécessairement proportionnelle à l'âge, car le déclin de la transpiration avec l'âge est un phénomène bien connu pour le Pin maritime (Delzon et Loustau, 2005). Par contre, l'augmentation du LAI augmente l'interception par le feuillage. Pour le Pin maritime, la surface foliaire varie peu après 20 ans (Guyon et al., 2003). Si la pluie efficace diminue localement, une différence de niveau piézométrique peut devenir visible. Lambert (1996) signale que dans les Landes de Gascogne, la coupe rase d'une pinède fait remonter le niveau de la nappe de 0.6 à 1 m.

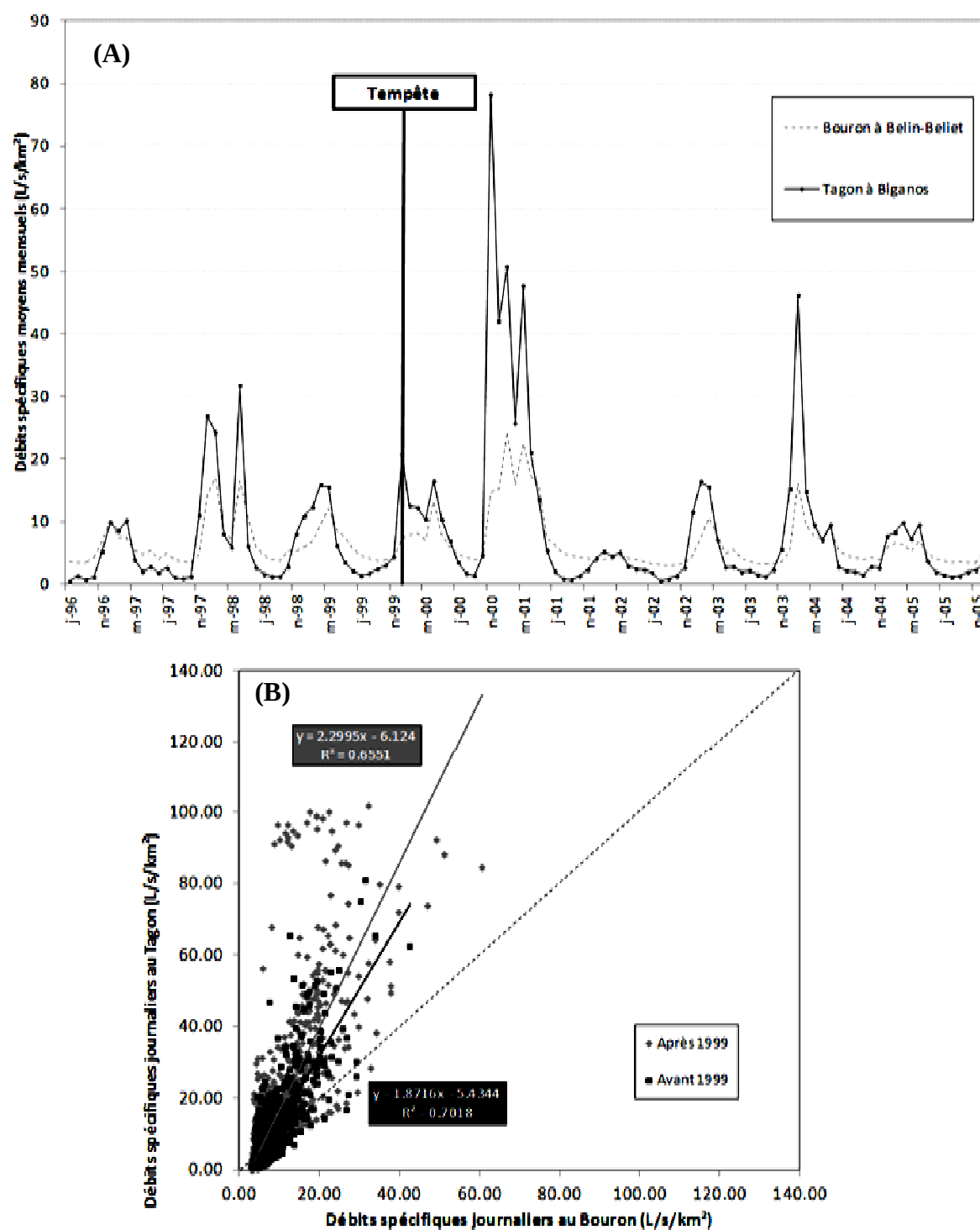


Figure VI-1 : Comparaison des débits du Bouron et du Tagon avant et après la tempête de 1999 : (A) Débits spécifiques moyens mensuels entre 1996 et 2005, (B) Relation entre les débits spécifiques journaliers du Bouron et du Tagon, avant et après la tempête 1999.

La mise en place d'un outil de simulation du fonctionnement de l'aquifère permettrait de tester différents scénarios, et éventuellement d'anticiper les conséquences de la modification du climat ou des ECE sur les bilans hydriques régionaux.

Le modèle de croissance GRAECO reproduit le fonctionnement de peuplement de Pin maritime, avec un sous-bois de Molinie (*Molinia caerulea*), à l'échelle de la parcelle. Dans l'objectif à court terme de spatialiser ce modèle, afin de mieux contraindre les bilans hydriques et carbonés à l'échelle de paysages, une représentation réaliste du drainage latéral et de la dynamique de la nappe est souhaitable. En effet, ce modèle prend en compte les prélèvements dans la nappe par la végétation lorsque celle-ci se trouve dans la zone racinaire, ce qui conditionne donc la satisfaction de l'ET potentielle. La vidange de l'aquifère est simulée par une courbe empirique décroissante qui est fonction de la profondeur maximale atteinte par la nappe et fondée sur les observations au site du Bray.

Inversement, le calcul d'une recharge prenant en compte de façon réaliste les processus de surface est déterminant pour la simulation hydrologique. Pour une même quantité de pluies incidentes, par exemple 150 mm/mois, la réponse à l'exutoire peut être comprise entre 9.2 mm/mois et 95.6 mm/mois, sur le bassin versant du Bouron, en fonction de la période de l'année, traduisant l'importance du rôle des processus de surface dans un système aquifère tel que celui des Landes. Peu d'études se sont attachées à reproduire spécifiquement le fonctionnement de l'aquifère plio-quaternaire dans un modèle hydrogéologique, hormis, les travaux de stagiaires réalisés sous la direction de Chossat, J.C., au CEMAGREF de Bordeaux (Duzan, 2001 ; Vittecoq, 2002 ; Maison, 2004). Pourtant, la modélisation de la nappe sur un bassin versant expérimental permettrait de comprendre la variabilité spatiale et les facteurs principaux influençant la dynamique de la nappe à différents pas de temps.

Le travail réalisé ci-après pose les bases d'un projet de couplage du modèle de fonctionnement du Pin maritime GRAECO (Porté, 1999 ; Loustau et al., 2001, 2005 ; Porté et Loustau, 2001 ; Ciais et al., 2010) et du modèle hydrogéologique NEWSAM (Ledoux, 1980 ; Ledoux et al., 1984 ; Levassor et Ledoux, 1999). Le bassin versant du Bouron a été choisi à cet effet, en raison du plus grand nombre de données hydrogéologiques historiques disponibles (trois sites de validation : une station hydrométrique et deux piézomètres), mais aussi parce que les chroniques de suivi des débits et de la piézométrie étaient les plus longues. Pour caractériser l'aquifère libre superficiel du Bouron, une étude géologique complète est d'abord conduite, afin d'obtenir une représentation du mur de l'aquifère (substratum) ainsi que son épaisseur. Elle permet de cerner la variabilité lithologique, de comprendre et enfin d'expliquer les différences de fonctionnement hydrodynamiques existant entre les différents points d'observation des fluctuations de nappe.

Dans un second temps, la modélisation de l'aquifère est entreprise avec le modèle NEWSAM. Le régime permanent permet de caler : (1) la distribution de la transmissivité (T,

[$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]), paramètre en lien avec la variabilité lithologique, et l'épaisseur de l'aquifère, ainsi que (2) le coefficient de transfert dans le lit du cours d'eau qui assure/limite les échanges entre le domaine de surface (rivière) et souterrain. Le régime transitoire permet ensuite le paramétrage du coefficient d'emmagasinement (S , [-]) pour une période de simulation de 20 ans, au pas de temps mensuel, en lien avec la dynamique de la nappe observée aux différents piézomètres et celle du débit à l'exutoire du bassin versant. Plusieurs types de recharge sont utilisées comme forçage et inter-comparées, en particulier, les valeurs mensuelles de bilans de type Thornthwaite et les valeurs calculées par le modèle GRAECO. Ainsi calé, le modèle est ensuite utilisé au pas de temps journalier, afin de vérifier la robustesse du modèle pour un pas de temps plus court. Par ailleurs, le modèle journalier permet aussi de réaliser un test de sensibilité à la recharge en fonction de la distribution en classe d'âge des couverts forestiers.

PARTIE 1. Etude du système hydrogéologique

6.2 Matériel et Méthode

6.2.1 Mesures et données utilisées

Les mesures piézométriques et de débit utilisées, ainsi que les campagnes de caractérisation des cours d'eau, ont été décrites au chapitre II.

Quarante (40) forages BRGM, quatre (4) forages décrits par Besbès en 1963 et six (6) comptes-rendus de forages réalisés pendant cette thèse ont été utilisés pour définir en trois dimensions la formation aquifère plio-quaternaire sur le bassin versant du Bouron (Voir en Annexe C le récapitulatif des forages utilisés et leur localisation²³). Les mesures contemporaines permettent, en complément des données historiques, de retrouver une information sur la géométrie de l'aquifère, le type de formation aquifère, et les conditions aux limites.

Les 50 forages décrivant, avec plus ou moins de précision, les horizons plio-quaternaires autour et sur le bassin versant du Bouron ont été utilisés pour dresser la carte du mur de l'aquifère, i.e. le substratum, et ont permis de comprendre la répartition des différentes strates lithographiques.

Une carte établie par Bèsbes, en 1963, donnant les isohypses de la base de l'aquifère plio-quaternaire dans la région du bassin versant du Bouron a été actualisée à l'aide des nouveaux forages disponibles sur la zone d'étude rencontrant le miocène. Le traitement a consisté en une numérisation de la carte de 1963, puis par la modification manuelle des isohypses en fonction des informations disponibles sur la zone. La profondeur de forage des autres points, dans lesquels le miocène n'a pas été reconnu donne aussi une indication sur la profondeur minimum du miocène, donnée utile pour établir la nouvelle carte. Par ailleurs, les informations issues de tous les forages ont été saisies dans un SIG (ArcGIS, V9.3).

Pour chaque point, l'épaisseur de chaque strate est connue. En raison d'un nombre de points insuffisants et répartis aléatoirement dans l'espace, l'utilisation d'une méthode de krigage n'a pas été possible. Les valeurs ont donc simplement été interpolées, à l'aide de l'outil «Spatial Analyst - Topo to Raster» (interpolation spline, par différences finies itératives). Cette méthode permet de respecter la condition au point, mais pour être exacte en chaque point de la grille raster, la somme des épaisseurs de toutes les strates a été forcée de telle sorte qu'elle soit égale à la somme de l'épaisseur totale de l'aquifère, par une règle de proportionnalité. Ces résultats sont ensuite relus et lissés sous R (fonction Kernel, ou noyau, de Danniell) pour réaliser des coupes schématiques.

²³ Le numéro indiqué en première colonne de cette table correspond au numéro (N°) qui est toujours utilisé pour citer ci-après les forages. Pour connaître le nom du puits ou le code BSS correspondant, il est nécessaire de se reporter à la table en annexe C.

Les mesures de profondeur du niveau d'eau dans les piézomètres et forages, réalisées manuellement tous les 15 jours, ont été converties en charges hydrauliques (mètre NGF), afin d'établir les cartes piézométriques pour l'année hydrologique 2009-2010. Les valeurs ont été interpolées linéairement entre les points pris deux à deux. Lorsque cela a été possible, ces cartes ont été complétées par les mesures de la côte de l'eau dans la rivière, réalisées lors des campagnes de caractérisation des cours d'eau (voir chapitre II).

A partir de la piézométrie du bassin versant du Bouron et connaissant la topographie du substratum, l'épaisseur de la formation aquifère saturée peut être calculée. Les isohypses de l'épaisseur de la zone saturée sont obtenues sous ArcGIS par lissage manuel des résultats du calcul, réalisé avec la calculatrice raster (Spatial Analyst).

De la même manière, en connaissant la topographie du toit de l'aquifère et la piézométrie, la puissance de la zone non-saturée peut-être estimée. Les isohypses de l'épaisseur de la zone non saturée ont été calculées sous ArcGIS, puis lissées et regroupées en lande humide (groupe 0-2 m), en lande mésophile (groupe 2-4 m), et en lande sèche (groupe plus de 4 m) (Augusto et al., 2006).

6.3 Propriétés du système hydrogéologique étudié

6.3.1 L'aquifère plio-quaternaire du bassin versant du Bouron

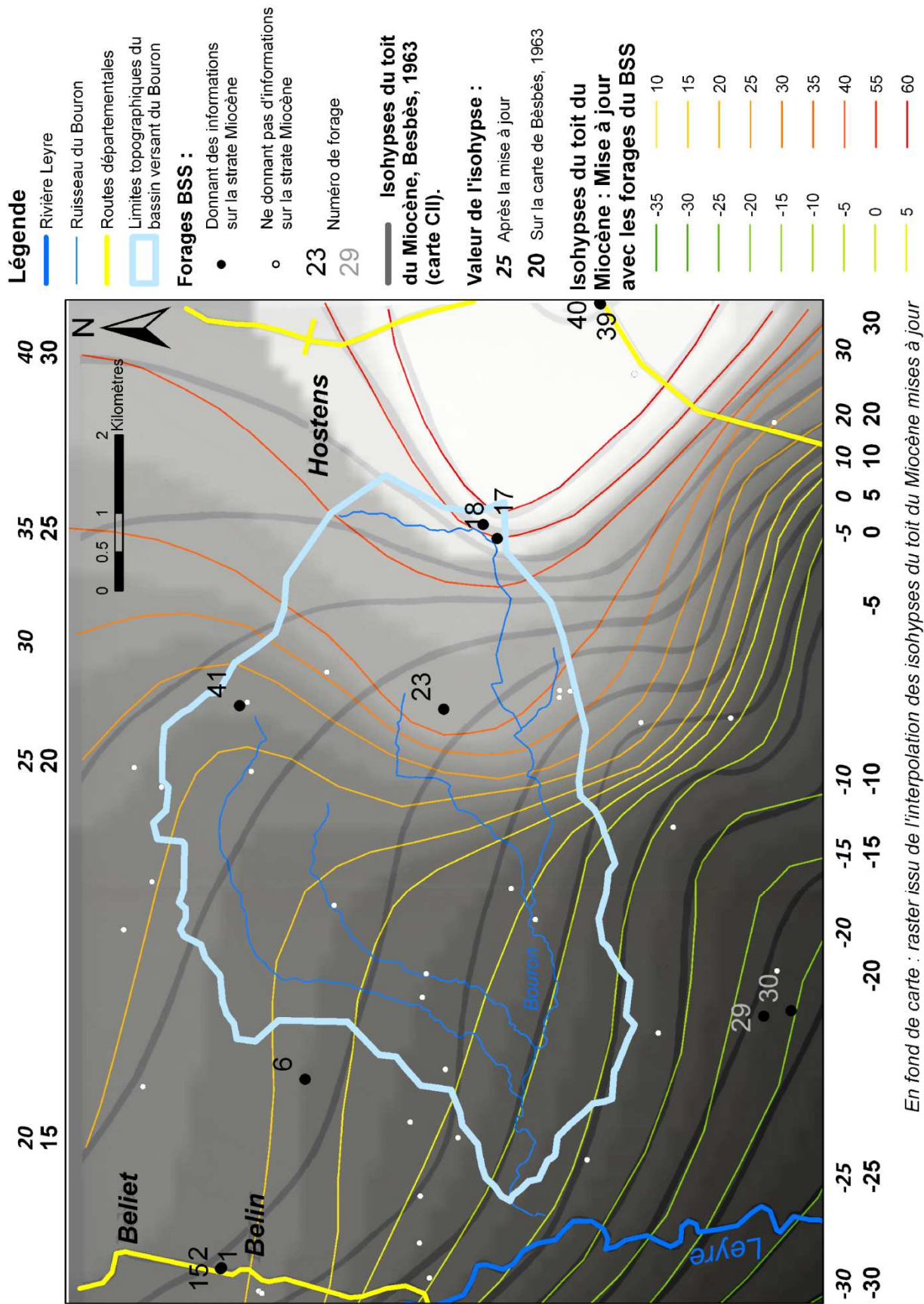
6.3.1.1 Côte et nature du substratum

La signature du substratum de l'aquifère plio-quaternaire est caractérisée par la présence de fossiles marins, ce qui le rend nettement distinguable des formations plio-pléistocènes azoïques. La plupart des forages n'ont cependant pas permis d'identifier les dépôts datant du miocène, notamment en raison de leur faible profondeur d'investigation. Cependant, il a été possible de confronter les données de quelques forages suffisamment profonds (14 forages) avec une carte établie par Besbès, en 1963. Pour établir sa carte, il ne disposait que de 3 forages atteignant le miocène sur la zone d'étude : à Belin (N°1), à Canet (N°17), forages également décrits sur la base BSS, et à Haudoua (N°41).

A l'exception des forages N° 1, 17 et 41 décrits par Besbès, la plupart des forages ont été réalisés entre 1966 et 2005, sauf le forage N°2 (1955). Sur le secteur d'étude, un nombre plus important de forages est donc désormais disponible pour dresser la carte du substratum. Trois forages récents, au sud-ouest du bassin versant, sont en accord avec la carte établie par Besbès, la valeur de la côte du substratum étant comprise entre les bornes des isobathes -10 et -20 m NGF (forages N°29, 30, et 34). En revanche, les forages disponibles au nord-ouest (N°2, 6, 15 et 23) et au nord-est (N°18, 25, 39, et 40) montrent une erreur comprise entre 5 et 10 mètres, la carte de Besbès sous-estimant la profondeur du substratum. A partir de toutes ces informations et en se fondant sur la carte déjà établie, les isobathes au nord de la carte ont été modifiées afin d'établir une nouvelle carte de la côte du substratum miocène (Figure VI-2).

La côte du substratum sur la région est comprise entre +60 m NGF et -35 m NGF, soit entre +60 m NGF à -5 m NGF pour le bassin versant topographique du Bouron sensu stricto. A l'ouest, le substratum s'incline du nord vers le sud, tandis qu'à l'est, sur une ligne comprise approximativement entre Joué et Canet, il a la forme d'un dôme qui part en pente douce en direction d'Hostens au nord, et de Mano au sud. Cette différence de forme entraîne une zone de forte déclivité au milieu du bassin versant en direction du sud, à l'endroit où le dôme s'aplatit, juste sous Retis. Au nord, le substratum ressemble à un plateau. La présence de l'anticlinal de Villagrains-Landiras, situé au nord-est du bassin versant et ayant affecté les terrains miocènes, explique cette topographie relativement accidentée.

Figure VI-2 : Isohypes du toit du Miocène, mise à jour de la carte établie par Besbès en 1963 à partir des forages BSS, pour le bassin versant du Bouron.



Par définition, le sommet du miocène est le substratum de la nappe plio-quaternaire. Cependant, certains auteurs (Roux, 2006) considèrent le toit des dépôts miocènes comme un aquitard, ce qui implique que la nappe plio-quaternaire participe, dans certains secteurs, à l'alimentation des nappes plus profondes par phénomène de drainance verticale descendante, si le gradient hydraulique entre les deux aquifères le permet. Peu d'informations sont disponibles sur le bassin versant du Bouron concernant les formations miocènes, mais elles semblent formées de dépôts sableux compacts ou gréseux, et donc potentiellement perméables.

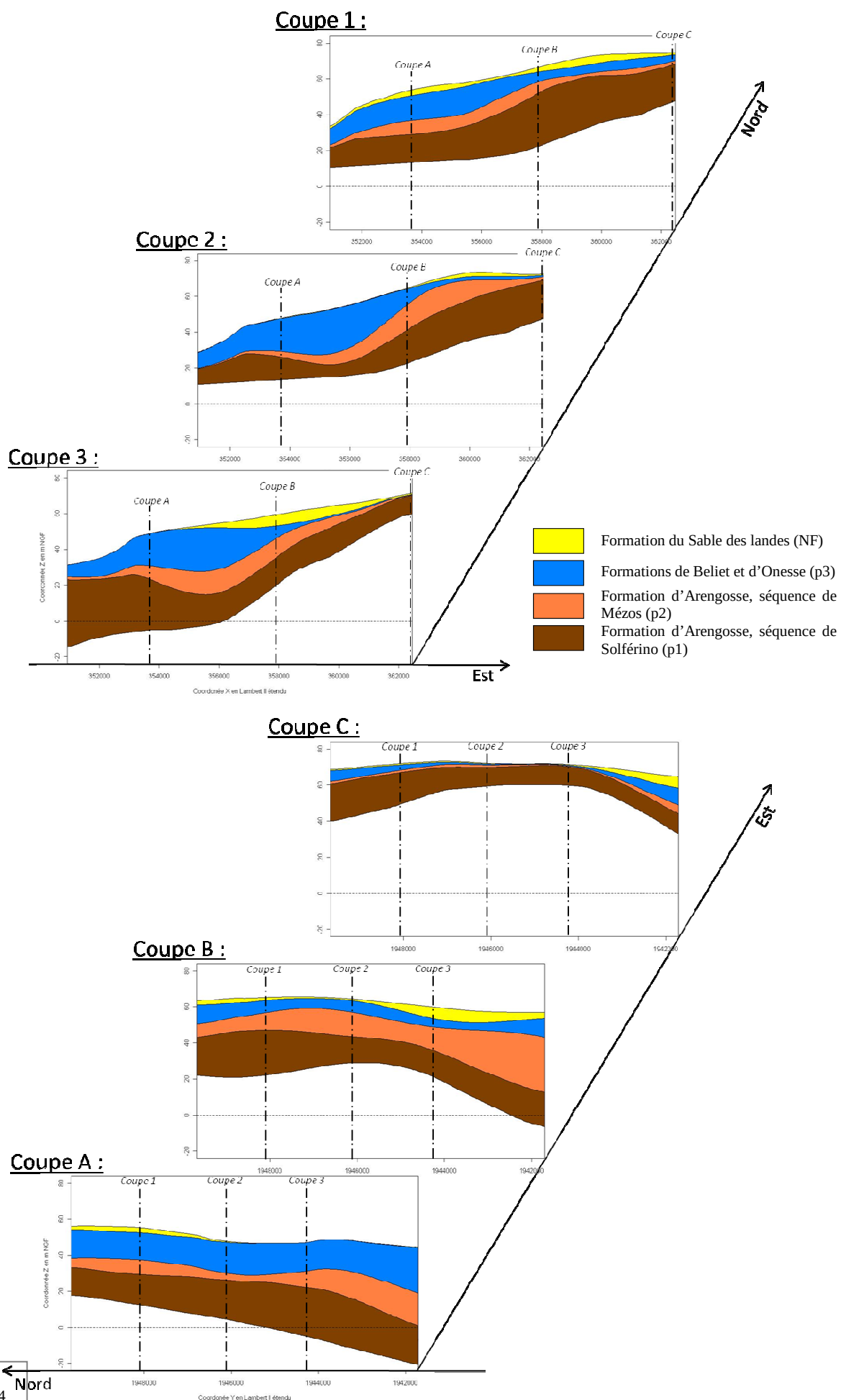
Corbier et Karnay (2010) considèrent que la formation des Glaises bigarrées est le seul niveau imperméable d'extension régionale qui peut séparer l'aquifère miocène de l'aquifère plio-quaternaire. Une grande majorité des forages en amont du bassin versant présente des faciès argileux d'importance métrique. Dans leur étude à l'échelle régionale, Corbier et Karnay (2010) semblent considérer qu'il s'agit d'une couche homogène de type m5. Les études locales, telles que celles de Casenave (1970) et de Besbès (1963), ayant porté spécifiquement sur le bassin versant du Bouron attribuent ces mêmes argiles au pliocène. Douze forages présentent des niveaux d'argile supérieurs ou égaux à 5 m d'épaisseur (N°6, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 27, 28, 37, 40). Parmi ces derniers, dans 4 forages seulement ces argiles se retrouvent directement au contact du miocène (présence de fossiles) : les N°6, 18, 25, 40. Pour tous les autres, et malgré une description colorée et l'utilisation des termes « bigarrée » ou « bariolée » dans le compte-rendu de forage, ces argiles sont attribuées au pliocène (p1 ou p2). Après avoir considéré les forages voisins, la description faite des argiles, ainsi que les couches entre lesquelles elles s'intercalent, seules les argiles observées dans le forage N°25 ont pu clairement être attribuées à la formation des glaises bigarrées.

La formation des sables fauves du miocène supérieur est incluse dans la superposition virtuelle constituant l'aquifère libre supérieur. Cette formation se trouvant sous les Glaises bigarrées, est constituée de sables plus ou moins fins, allant de l'ocre au rouge, parfois verdâtres à blanchâtres, et pouvant être azoïques. En l'absence des Glaises bigarrées, et étant donné sa ressemblance avec la formation d'Arengosse (sables plus ou moins grossiers roux à verdâtres ; Karnay, 1993 ; Alvinerie et Gayet, 1973), ces deux strates n'ont pas été distinguées par la suite.

6.3.1.1 *Type de formation aquifère*

Trois coupes longitudinales (est-ouest, numérotées de 1 à 3 du nord au sud) et trois coupes latitudinales (nord-sud, numérotées de A à C de l'ouest à l'est) ont été extraites (Voir annexe C pour leur localisation sur le bassin versant, et Figure VI-3 pour les coupes). Les observations réalisées au cours des forages, dans le cadre de cette étude sur les terrains à l'affleurement (Tableau II-3), concordent relativement bien avec les cartes géologiques établies dans la région par le BRGM. A noter que la formation du sable des Landes n'est

Figure VI-3 : Coupes stratigraphiques schématiques sur le bassin versant du Bouron



indiquée sur les cartes au 1/50 000 que lorsque les épaisseurs sont supérieures à 3-5 m (Corbier & Karnay, 2010).

L'aval du bassin versant, à l'ouest, se distingue nettement de l'amont, à l'est, par la présence en affleurement de la formation p3, sableuse, généralement graveleuse et plus ou moins argileuse (voir Figure VI-4, forages N°6, 10, 11, 32). Sa puissance est maximale au sud-ouest, et peut dépasser 35 m. Seule la partie nord est surmontée d'une couche de sables NF de quelques mètres d'épaisseur.

Cette couche de sables NF est en revanche toujours présente en amont du bassin versant, du nord au sud. En règle générale, les dépôts p3 sont plus réduits voire absents en amont du bassin versant. Les formations p2 et p1, généralement des argiles plus ou moins sableuses, représentent les strates les plus importantes en épaisseur et se rencontrent directement sous des assises de sables purs (voir Figure VI-4, forages N°17, 20, 23 et 37). La puissance de ces formations du pliocène supérieur à moyen n'est pourtant pas maximale à cet endroit, en raison du relèvement du substratum : elle n'est que de 13 m alors qu'elle peut atteindre 40 m en aval.

Les forages N°11, 16, et 22 (Figure VI-4) peuvent être considérés comme des forages de transition, la plupart des formations plio-quaternaire étant bien représentées.

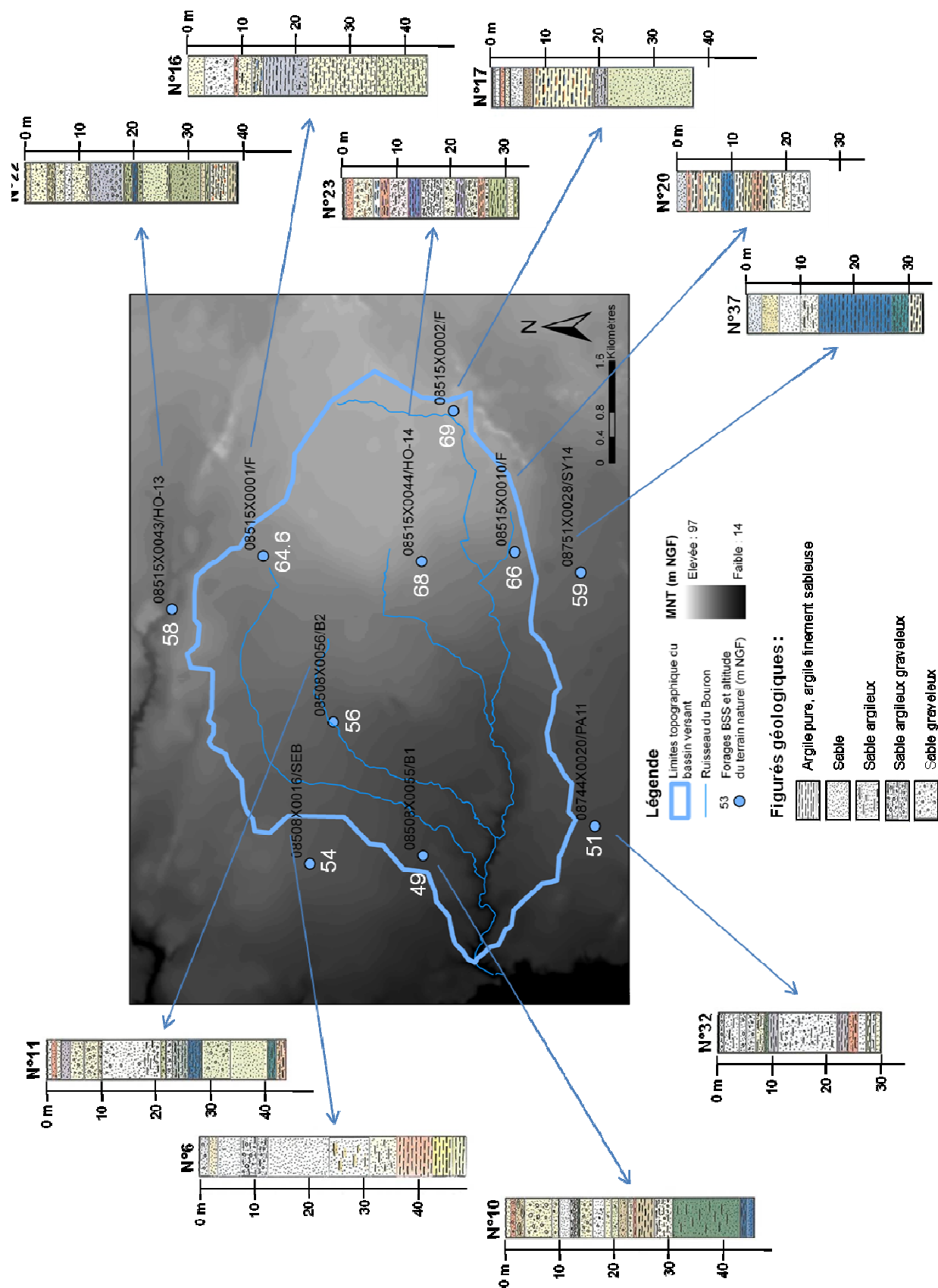
L'amont du bassin versant, argileux et peu épais, se distingue bien de l'aval du bassin versant, formé d'assises plus drainantes, de puissance très importante.

Parmi les forages BSS étudiés, peu sont situés sur le bassin versant du Bouron, et parmi ces derniers, seulement 3 forages atteignent le miocène (forages N°6, 17 et 23). Pour ces forages, la proportion respective des argiles, des sables, des sables et graviers et des sables et graviers argileux dans les strates plio-quaternaires peut être étudiée.

Le forage N°6 se compose de haut en bas de : 10 % de sable, 7 % de sable et gravier, 47 % de sable et gravier argileux, et de 36 % d'argile. Cet empilement est retrouvé dans les forages voisins, avec toujours une dominance des épaisseurs de sable et gravier argileux (forage N°10 et tout particulièrement dans le N°32) ou bien de sable et gravier propres (forage N°11). Les argiles ne sont retrouvées qu'en fin de forage.

Le forage N°17 est très différent, avec de haut en bas : 37 % de sable, 31 % d'argile, 8 % de sable et gravier argileux, et 24 % de sable et gravier. La proportion de sable en surface est peu représentative des forages alentours, dans lesquels elle est toujours présente mais faible. En effet, ce forage se trouve en zone de dunes fossiles. Elles sont bien visibles sur le fond de carte de la Figure VI-4, représentant les altitudes sur la zone d'étude. En revanche, la dominance de l'argile, en surface et sur une assez grande épaisseur, correspond bien la signature de tous les forages situés en amont du bassin versant. Le forage N°20 en est l'exemple le plus extrême.

Figure VI-4 : Situation et coupes de forages extraites de la base BSS du BRGM (représentation des strates de l'aquifère plio-quaternaire uniquement : le miocène n'a pas été représenté lorsqu'il a été observé).



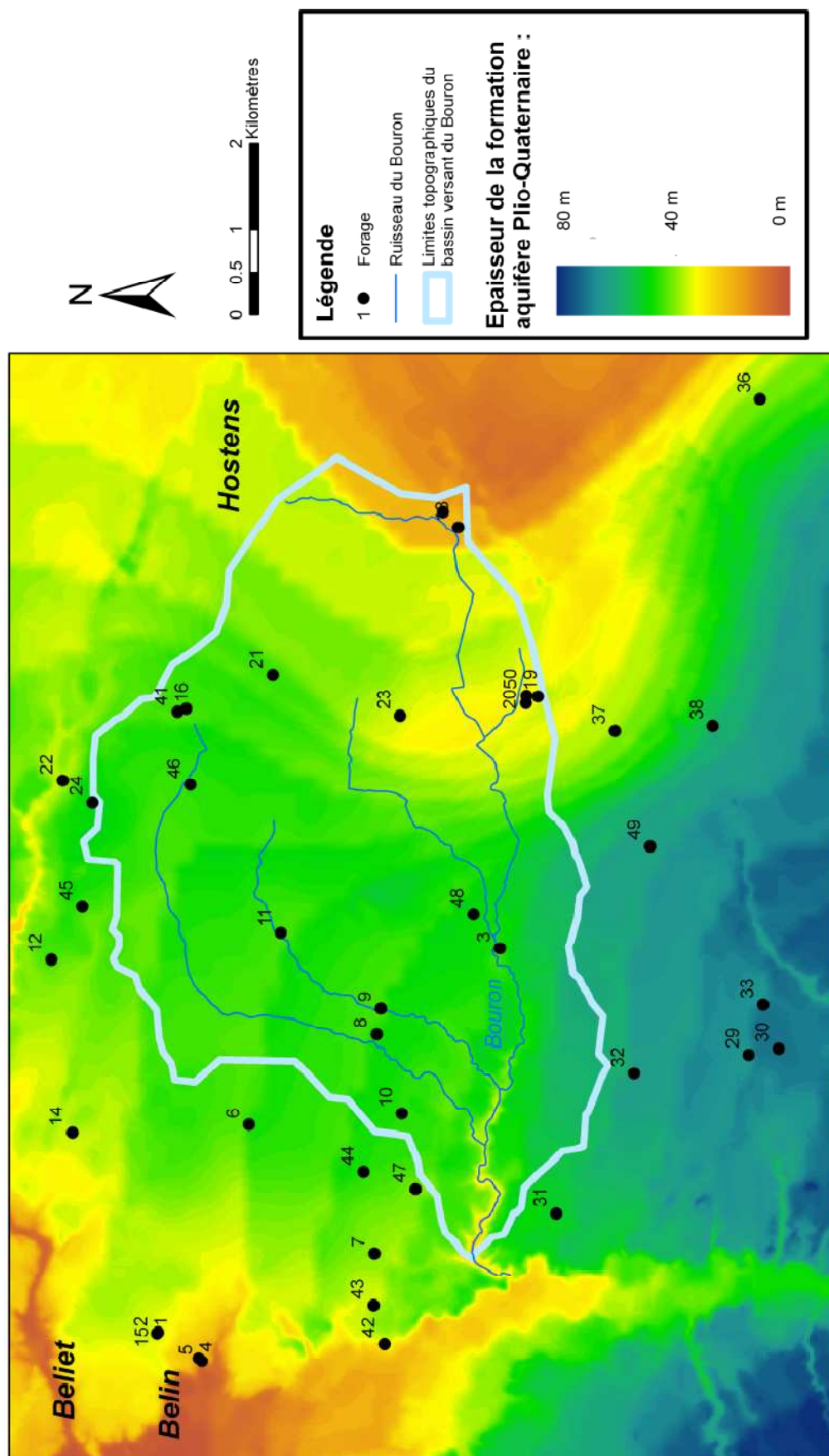


Figure VI-5 : Epaisseur de la formation aquifère plio-quaternaire sur le bassin versant du Bouron

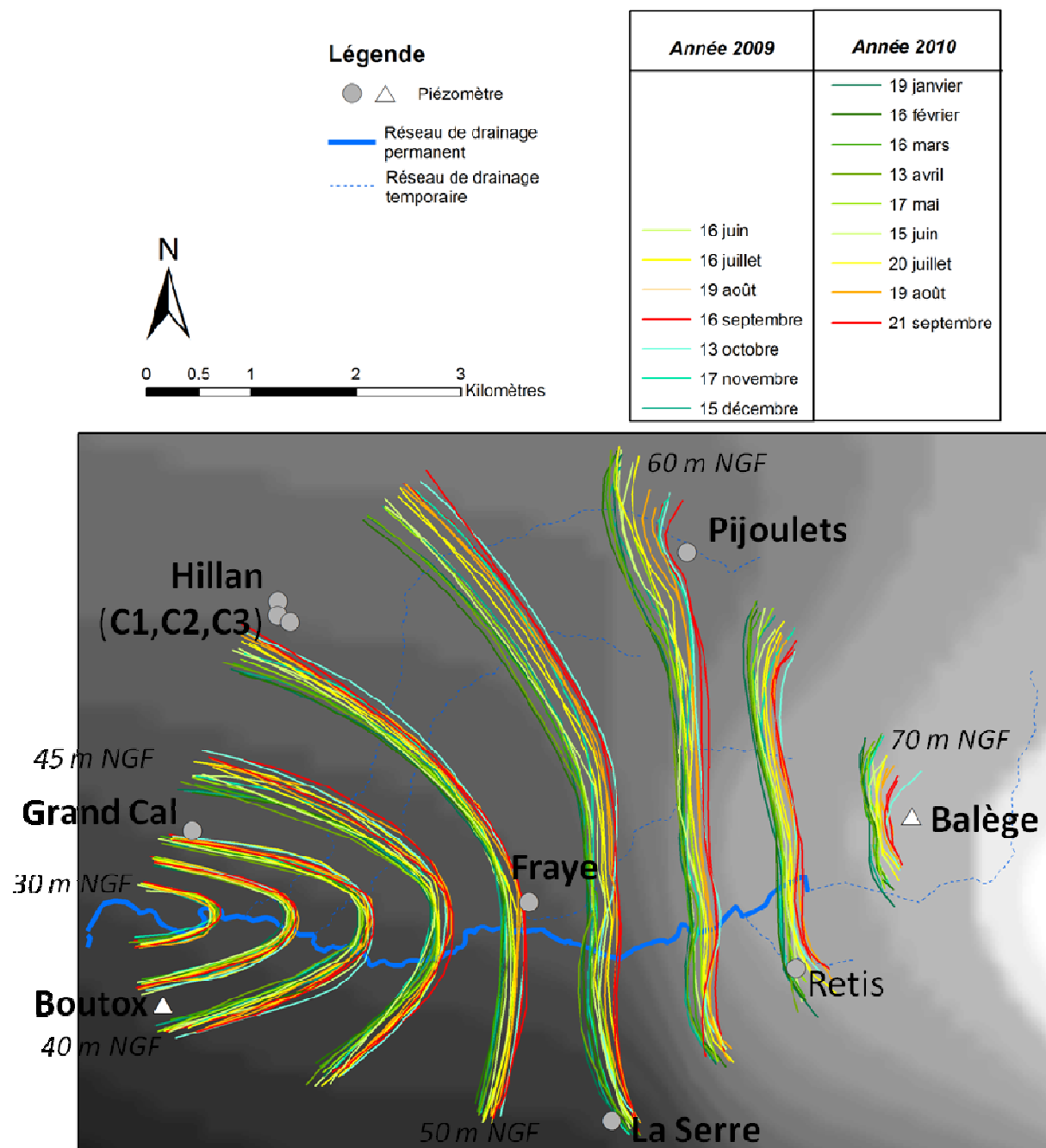


Figure VI-6 : Isopièzes de l'aquifère plio-quaternaire sur le bassin versant du Bouron, en relation avec la topographie du substratum entre le 16 juin 2009 et le 21 septembre 2010.

Le forage N°23 est localisé près du centre du bassin versant. Il se compose de haut en bas de : 5 % de sable et de gravier argileux, de 16 % de sable, de 41 % de sable et de gravier, et de 38 % d'argile. Ce forage est un intermédiaire aux forages N°6 et 17, avec une proportion presque égale de sable-gravier, et d'argile ; les deux types étant inter-stratifiés en bancs successifs. Cette variabilité est aussi visible dans le forage N°22.

6.3.1.2 *Epaisseur de la formation aquifère*

Sur le bassin versant, la puissance de l'aquifère est comprise entre 15 et 55 m (Figure VI-5). C'est en son centre et dans sa partie sud que nous observons les plus fortes puissances. En amont du bassin versant, l'aquifère est peu épais et constitué de couches d'argiles peu sableuses, donc peu perméables, tandis qu'en aval, là où la formation atteint sa puissance maximale, l'aquifère est constitué de couches de sables graveleux et argileux. L'hypothèse de la présence d'un aquitard entre le plio-quaternaire et le miocène, ne peut pas être définitivement rejetée, mais en première approche les flux à cette limite inférieure seront considérés comme suffisamment faibles pour être négligés, compte tenu des faciès lithologiques rencontrés sur le bassin versant. Cette hypothèse est d'autant moins forte que Boukerna (1987) a considéré qu'il était suffisant de ne simuler que le 1^{er} aquifère sachant que seulement 7% de l'eau de l'aquifère plio-quaternaire est transféré au miocène (modélisation détaillée en 8 couches des aquifères du bassin des Landes de Gascogne).

6.3.2 *Conditions aux limites hydrodynamiques de l'aquifère*

6.3.2.1 *Cartes piézométriques pour l'année hydrologique 2009-2010*

La direction des écoulements est dans le sens est-ouest en amont du bassin versant et s'incline vers le sud-est à l'aval, au niveau de l'exutoire (Figure VI-6). Les isopièzes se décalent vers l'ouest entre la période de crue et la période d'étiage, mais leur forme reste identique. Ce décalage crue-étiage est plus marqué au nord du bassin versant. Le gradient hydraulique (pente de la nappe) est relativement constant du nord-est au sud-ouest. Il est d'environ 0.4%. Cependant ce gradient marque un léger fléchissement vers l'ouest à partir de l'isopièze 60 m qui peut être mis en relation avec l'approfondissement du substratum et/ou une formation aquifère plus épaisse et/ou une lithologie plus grossière. Au nord-ouest, l'inversion de pente du substratum provoque l'inclinaison des filets d'eau vers l'exutoire du Bouron et de la Leyre. A l'est, le substratum forme un dôme plat qui se traduit par des isopièzes parallèles et incurvées vers le centre du bassin versant. Cette structuration est modifiée au centre du bassin versant par l'effet du drainage du ruisseau du Bouron et de ses affluents principaux. La surface piézométrique ne dépasse jamais la topographie : la nappe

peut affleurer en certains endroits mais il n'existe pas de zones inondées lors des crues hivernales.

L'épaisseur de la zone non saturée est visible sur la Figure VI-8. Les résultats obtenus peuvent être comparés avec les travaux réalisés par Besbès au cours de sa thèse (1963). Il a en effet établi une carte des types de landes dans laquelle le bassin versant du Bouron est inclus (Figure VI-8). Ces deux cartes semblent assez différentes, car la carte de Besbès est fondée sur l'observation effective de la végétation du sous-bois. L'auteur constate d'ailleurs qu'il est difficile de relier la répartition spatiale des zones d'égale profondeur de la nappe avec les types de landes. Il note une correspondance entre lande humide et profondeur de nappe comprise entre 0.5 et 3 m d'une part, et entre lande mésophile à sèche et profondeur de nappe supérieure à 3 m d'autre part. Quelques traits communs ressortent malgré tout, une zone de lande sèche sur la bordure ouest du bassin versant est observable à la fois sur les données contemporaines et sur la cartographie de Besbès. Au centre du bassin, la bande nord-sud de lande humide, qui apparaît sur les données contemporaines, est en accord avec la carte de Besbès. En revanche, en amont du bassin versant l'épaisseur de la zone non saturée est importante, pouvant indiquer la présence de landes sèches bien plus étendues que celles observées en 1963. Des aménagements hydrauliques tels que la mise en place systématique de drains autour de parcelles, le surcreusement de fossés de route et l'aménagement en 1994 de la piste cyclable (par reconversion de la voie ferrée St-Symphorien-Hostens-Lesparre, abandonnée en 1978) ont pu modifier les conditions hydriques de surface.

Il faut cependant être critique vis-à-vis des cartes contemporaines. Il aurait fallu disposer d'un nombre supérieur de points d'observation pour dresser des cartes piézométriques plus fiables : au-delà des limites du bassin versant, d'importantes erreurs sur la piézométrie peuvent être commises (mauvaise extrapolation). De plus, les cartes piézométriques ont été établies par l'interpolation des mesures réalisées en 7 points, tandis que le MNT a une résolution de 25*25m.

La piézométrie peut être représentée en coupe (Figure VI-9). Autour de Retis, la nappe suit grossièrement la topographie, et même déborde en certains endroits (Coupe 4 et Coupe C). Il ne s'agit cependant que de la différence de résolution entre les deux types de données. L'interpolation, bien que moins précise, rend bien compte de la nappe très superficielle à cet endroit. En revanche, le MNT ne semble pas correctement reproduire le talweg du Bouron (Figure VI-7), qui est un petit cours d'eau, avec une vallée qui s'encaisse fortement uniquement sur la partie aval. Il est très probable que la taille des mailles du MNT choisi ne soit pas adaptée à ce type de petit bassin versant. Par conséquent, l'alimentation des rivières par écrêtage de la nappe n'est pas visible sur les coupes A, 4, et B (Figure VI-9). Dans la majeure partie des cas, le toit de la nappe se trouve juste à la limite entre la formation NF et la formation p3.

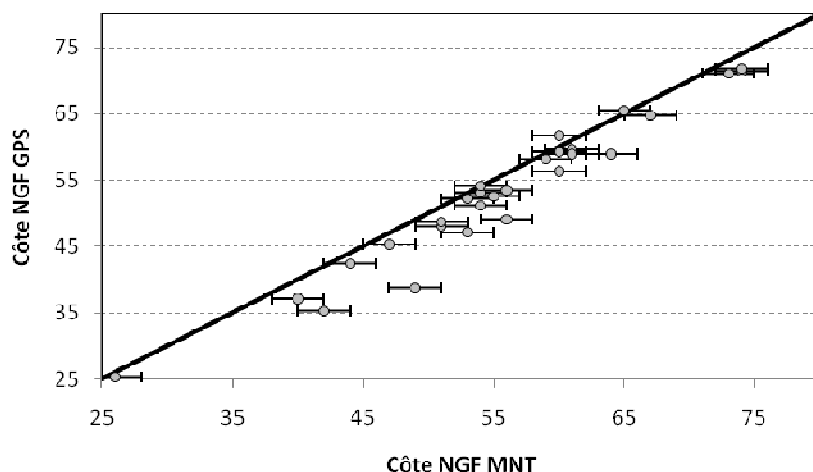


Figure VI-7 : Comparaison des valeurs données par le MNT (BD TOPO) et les valeurs mesurées par GPS avec corrections différentielles (précision métrique figurée par les barres d'erreurs).

6.3.2.1 Limites du bassin versant hydrogéologique

En raison du faible nombre de points suivis, il est difficile d'établir clairement les limites du bassin versant hydrogéologique sur le Bouron, à partir des cartes piézométriques issues de l'interpolation des données. En effet, alors que la limite sud suit quasiment la limite du contour topographique, la limite nord est plus incertaine. Le nombre de points situés en dehors du bassin versant est trop faible pour permettre un tracé précis de cette zone. Des limites approximatives ont donc été tracées pour la partie nord du bassin hydrogéologique et ont été comparées aux données historiques.

D'après les mesures contemporaines, la surface du bassin versant hydrogéologique est en moyenne de 32.95 km² (32.73 km² à l'étiage, novembre 2009, et 33.18 km² en crue, février 2010). Besbès (1963) obtient une surface égale à 39.07 km², tandis que Casenave (1970) donne une valeur de 33.87 km², plus comparable avec les données contemporaines.

La surface du bassin versant topographique, issue de l'analyse du MNT, corrigée par les relevés terrain, est égale à 34.84 km². Pour comparaison, Casenave (1970) trouvait 30.37 km². La DIREN, sur la base HYDRO, considère que le bassin versant topographique du Bouron a une surface de 36 km² (pas de contours disponibles).

Dans l'ensemble, toutes ces valeurs sont plutôt en accord, et les contours des bassins versants hydrogéologiques et topographiques sont relativement similaires (Figure VI-10).

L'analyse de ces cartes confirme l'indépendance du bassin versant du Bouron vis-à-vis des autres cours d'eau environnants, tant du point de vue du bassin versant topographique que du point de vue hydrogéologique. En amont du bassin versant, les eaux pluviales sont

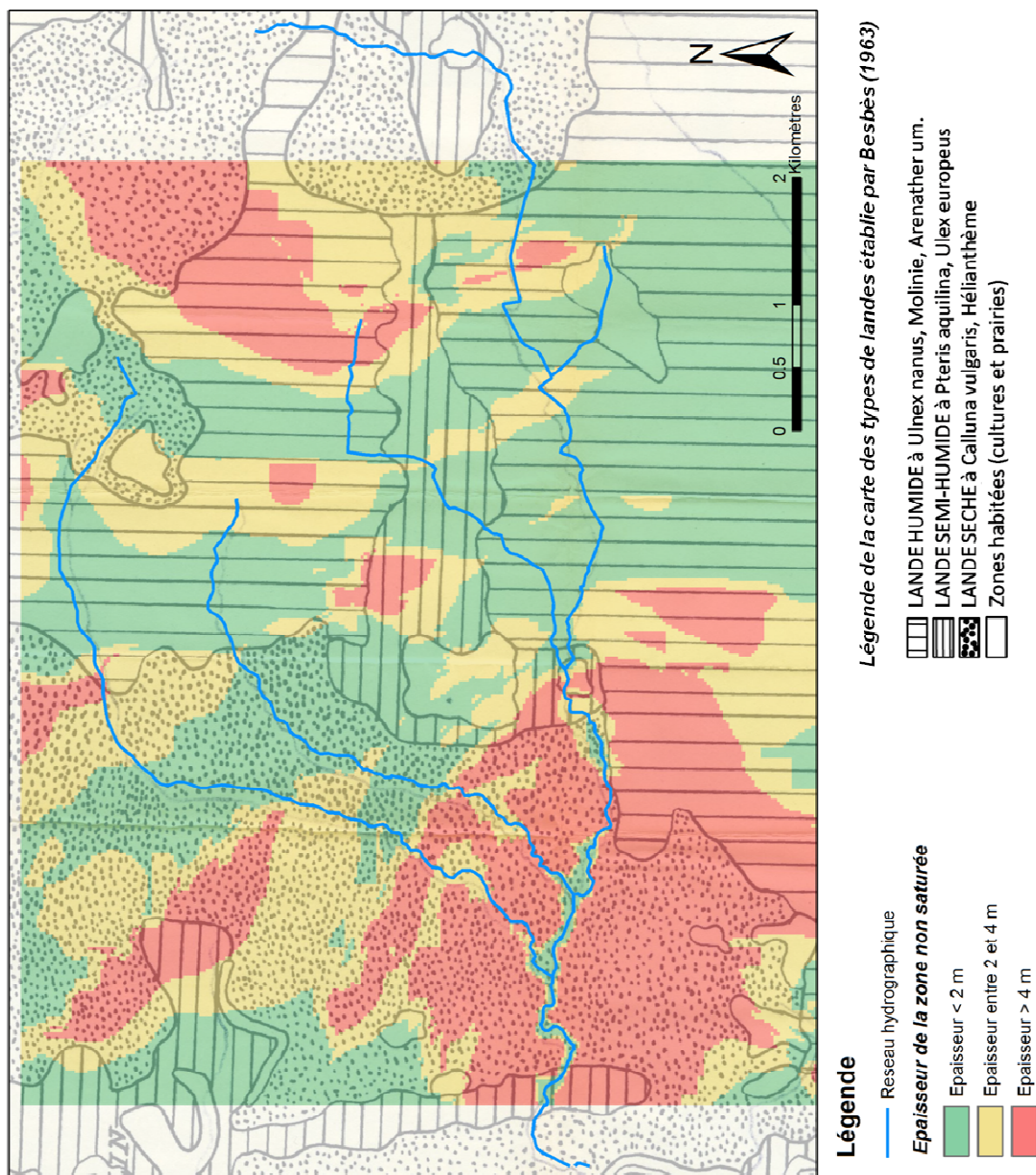
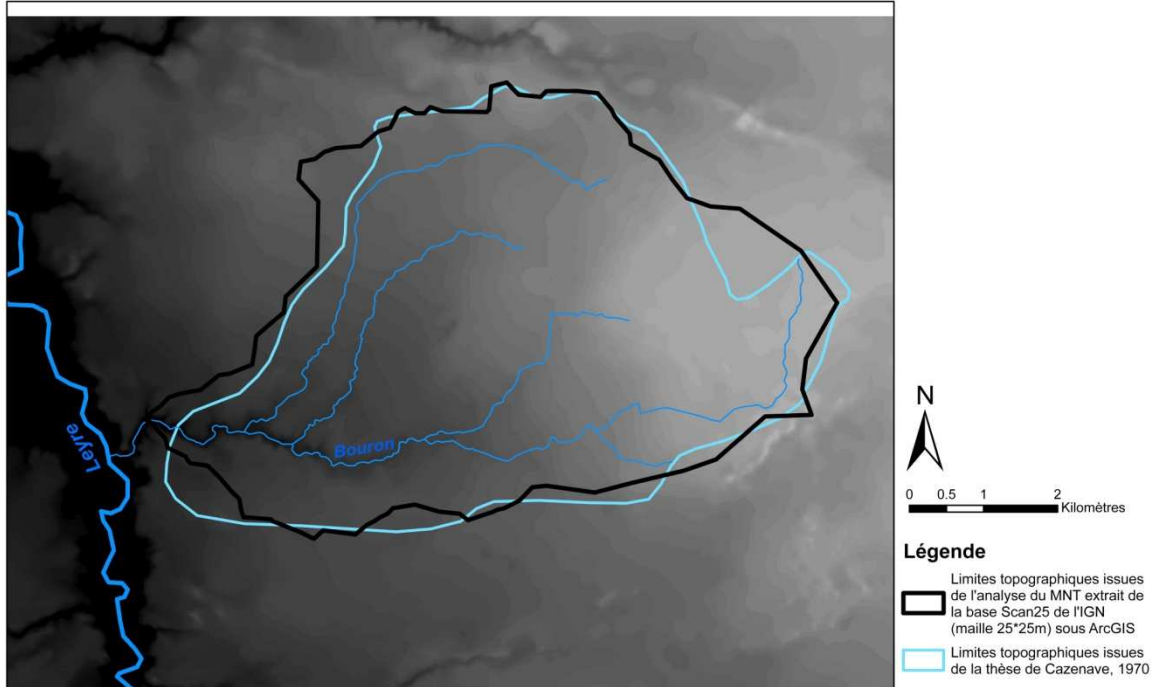


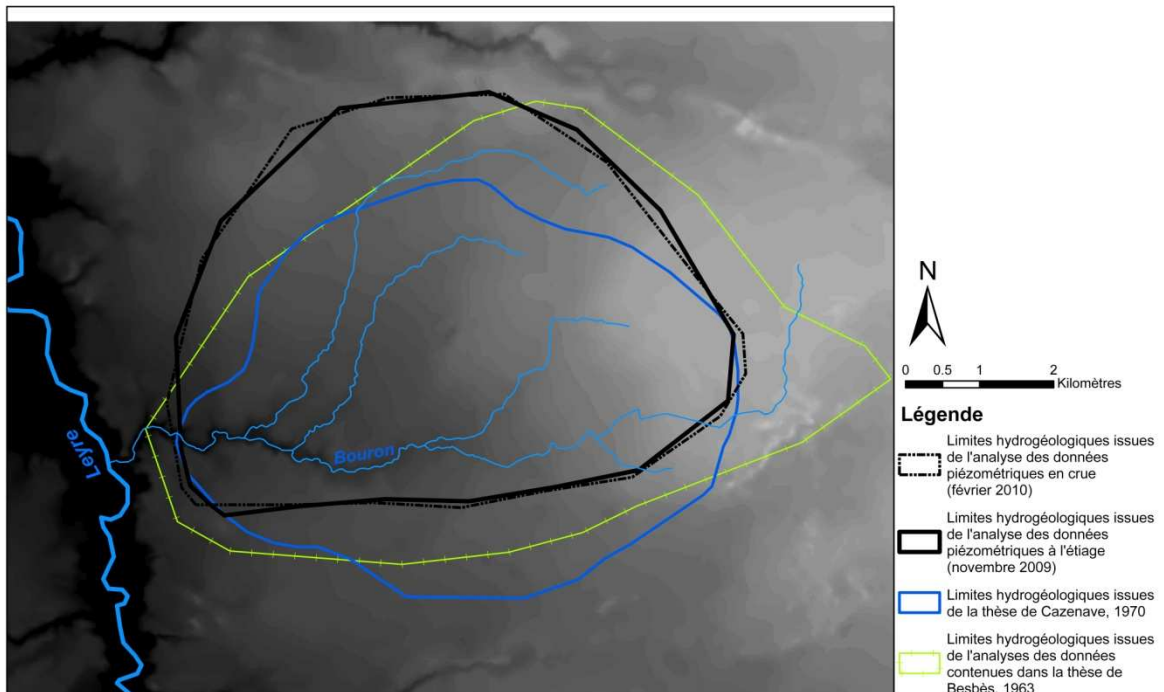
Figure VI-8 : Carte des types de lande réalisée à partir de l'étude de l'épaisseur de la zone non saturée sur le bassin versant du Bouron.

Figure VI-10 : Comparaison des données historiques et des données calculées en 2009-2010 : A) limites du bassin versant hydrologique, B) limites du bassin versant topographique. En fond de carte, le MNT issu de la base de données Scan25 de l'IGN (maille 25*25m).

(A)



(B)



drainées vers les deux cours d'eau encerclant le Bouron : le ruisseau de La Paillasse, situé au nord et le ruisseau de la Mounarde, situé au sud (confer cartes de Besbès, 1963 et de Casenave, 1970, ainsi que la carte des hydrohypsés sur le bassin versant de la Leyre, en page 171 du rapport de Corbier et Karnay, 2010).

6.3.2.1 *Dynamique piézométrique aux sites observés*

La description a été entamée au chapitre précédent, aussi nous mettrons en avant ci-après ce qui caractérise les différences spatiales de fonctionnement de l'aquifère. L'amplitude atteinte entre niveau de crue et niveau d'étiage dans les piézomètres est très variable (Figure II-12). Le site des Pijoulets se caractérise par la plus grande amplitude des sites observés, à savoir de 2.30 m au cours de l'année hydrologique 2010-2011. Au site de Fraye et de Grand Cal, elle est de 1.9 m la même année, tandis qu'à Lembarras, Hillan et Boutox, l'amplitude est d'environ 1.50 m. Les valeurs les plus faibles sont observées pour les sites de Balège et de La Serre, en amont du bassin versant, où l'amplitude est de 0.9 et 0.5 m respectivement. Cette répartition spatiale des amplitudes concorde relativement bien avec la carte de l'épaisseur de la zone saturée (Figure VI-5). Les plus fortes amplitudes sont localisées sur l'axe nord-est/sud-ouest correspondant aux plus fortes épaisseurs de l'aquifère.

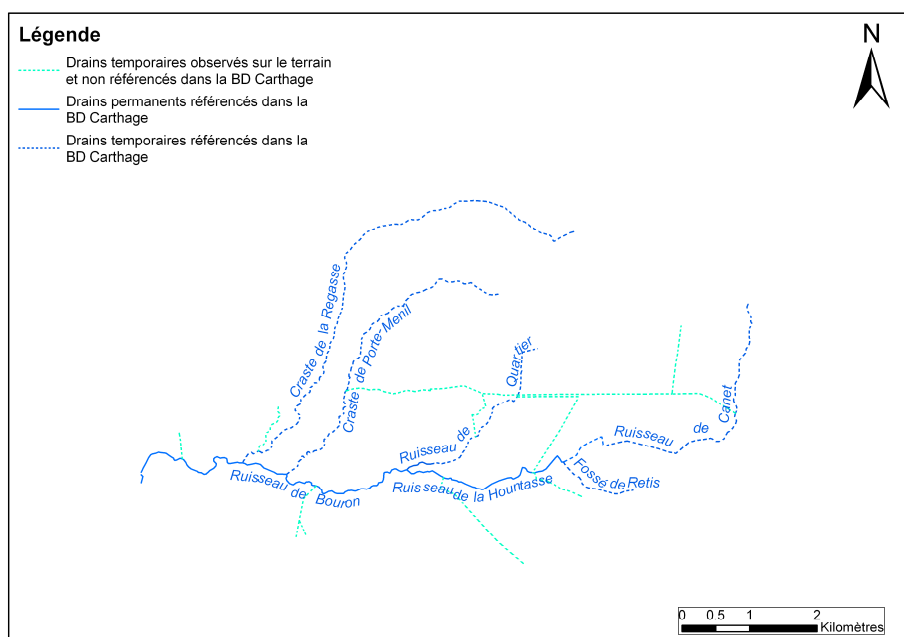
Le second aspect important est la proximité de la nappe avec la surface : plus celle-ci est superficielle, plus le signal de recharge par la pluie est visible. En effet, des oscillations rapides en période de crue sont caractéristiques des chroniques observées pour les sites de Retis, de La Serre de Fraye et de GrandCal. Le site de Fraye possède une particularité cependant, entre deux événements pluvieux, durant la recharge de l'aquifère en novembre-décembre 2009, la profondeur de la nappe reste constante, tandis que celle de Retis, de La Serre et de GrandCal diminue. Inversement, pendant la décharge du système à l'étiage 2010, en particulier entre juin et août, et de façon encore plus nette à partir de mai 2011, la nappe se vidange beaucoup plus rapidement à Fraye. Ce phénomène peut être lié à la proximité de la rivière qui, en crue, limite le drainage de l'eau localement et à l'étiage, draine rapidement les zones les plus proches du réseau hydrologique.

Les piézomètres de Hillan, Les Pijoulets et Lembarras présentent des chroniques moins oscillantes, avec une recharge lente et plus progressive de l'aquifère et un décalage temporel avec le maximum de crue observé aux piézomètres les plus superficiels. Ce délai peut atteindre 4 mois pour le piézomètre de Lembarras, où l'épaisseur de la zone non saturée est la plus importante observée. Ainsi cette dernière contribue notablement à l'amortissement du signal de recharge à la nappe aquifère.

6.3.2.2 *Connexion nappe/rivière*

Sur toutes les cartes historiques disponibles à l'échelle du bassin versant de la Leyre, les isopièzes forment un "V" au niveau des cours d'eau dont la pointe est orientée vers

(A)



(B)

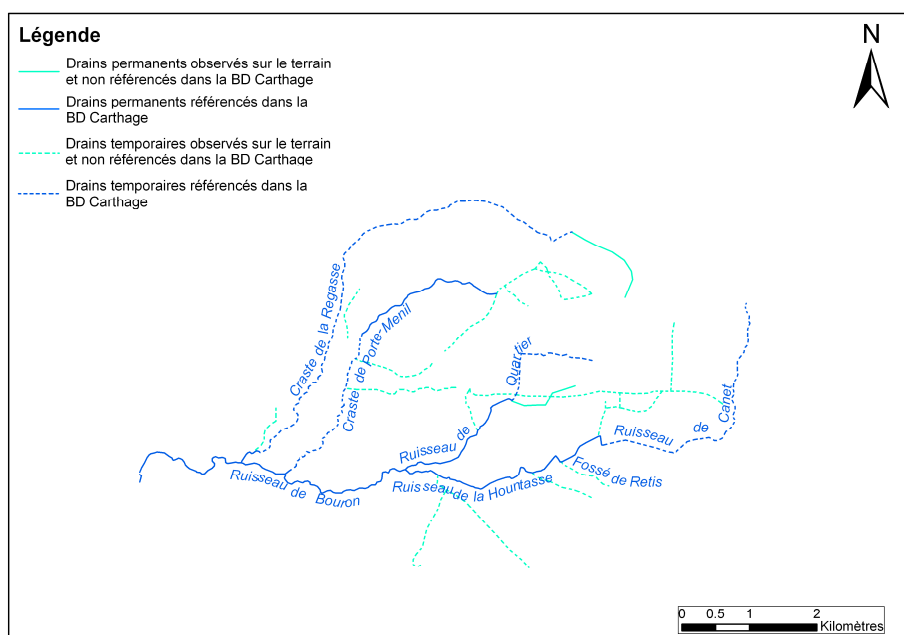


Figure VI-11 : Comparaison du réseau de surface observé : A) pendant l'hiver 2008-2009 et l'hiver 2010-2011, B) observé par Casenave en 1970

l'amont de la rivière et indiquent que les lignes d'écoulement au sein de la nappe convergent vers la rivière : la nappe est donc drainée par les cours d'eau. Cependant, cette relation ne semble pas être valable toute l'année, en effet, Corbier et Karnay (2010) estiment qu' « *il n'existe pas de corrélation simple et directement utilisable entre le débit d'étiage du cours d'eau et les niveaux piézométriques* ».

D'après la BD Carthage, le bassin du Bouron est drainé par 4 ruisseaux : le ruisseau du Bouron en tant que tel, et ses affluents : les ruisseaux de la Hountasse, de Quartier et de Canet (qui correspondrait à la source du Bouron). Sont aussi figurés dans la base les crastes, qui correspondent à des drains anciens dont la morphologie se rapproche de la rivière temporaire (Craste de la Regasse et Craste de Porte-Ménil), et le fossé de Retis. Au plus fort de l'étiage, seuls les ruisseaux du Bouron et de la Hountasse sont fonctionnels. En hiver, un réseau de drains forestiers et agricoles s'ajoute au réseau pour écrêter la nappe. Les drains peuvent atteindre un mètre de profondeur en certains endroits. Un certain nombre de changements ont pu être constatés entre les cartes établies par Casenave en 1970 et les observations contemporaines (Figure VI-11). Cependant, la campagne a été réalisée en grande partie après la tempête Klaus de janvier 2009, et certains sites étaient inaccessibles. De plus, le caractère privé des propriétés n'a pas permis l'accès (ou le retour) sur certains bras du cours d'eau. Ainsi, la carte contemporaine est probablement moins exhaustive que celle établie par Casenave en 1970.

Une campagne de terrain a été dédiée à l'étude de la côte de l'eau dans les cours d'eau du bassin versant afin de mieux comprendre les relations existant entre côte de la rivière et côte de la nappe. Elle a été réalisée à l'étiage, en octobre 2010 et en crue, en février 2011. L'acquisition de la côte de l'eau dans la rivière (voir chapitre II) a été une donnée précieuse pour contraindre le tracé des courbes à proximité de celles-ci (Figure VI-12 et Figure VI-13).

La partie aval de l'aquifère (courbe piézométrique 50m) subit un drainage par la rivière, quelque soit la période de l'année. A l'étiage, la relation nappe/riverie semble assez simple, avec déconnexion entre nappe et rivière en amont à partir de Retis, et une zone de drainage en aval à partir de Lembarras (Figure VI-12). En effet, seul le tronçon ruisseau du Bouron jusqu'au ruisseau de la Hountasse est actif, tous les autres bras étant à sec à cette période. En crue, le tracé des isopièzes est plus chaotique (Figure VI-13). Au nord, la craste de la Regasse, la craste de Porte-Ménil et le ruisseau de Quartier semblent apporter de l'eau à la nappe, tandis qu'au sud, la nappe est drainée par la rivière. Ce phénomène pourrait s'expliquer par les types de sol. En effet, l'aquifère est très peu épais en amont de Retis, le niveau de crue est plus rapidement atteint (voir chroniques piézométriques chapitre II). Au nord, en revanche, un décalage d'un à deux mois a pu être constaté pour le maximum de crue, il est donc possible que localement, la rivière participe à la recharge de l'aquifère, même en période de hautes eaux.

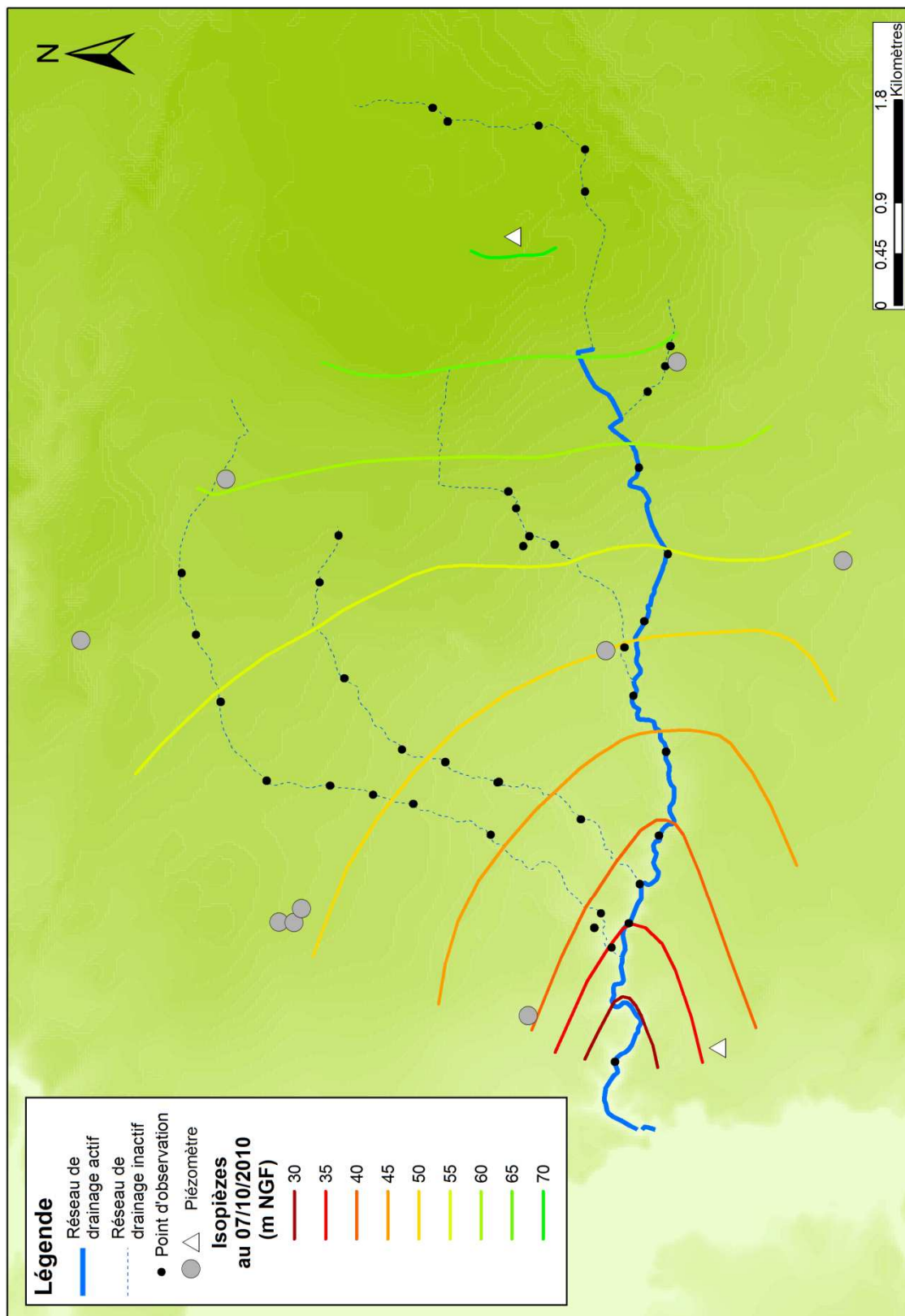


Figure VI-12 : Carte piézométrique à l'étiage, le 07/10/2010, prenant en compte les mesures réalisées dans les piézomètres INRA, BRGM et les mesures de la hauteur d'eau dans la rivière.

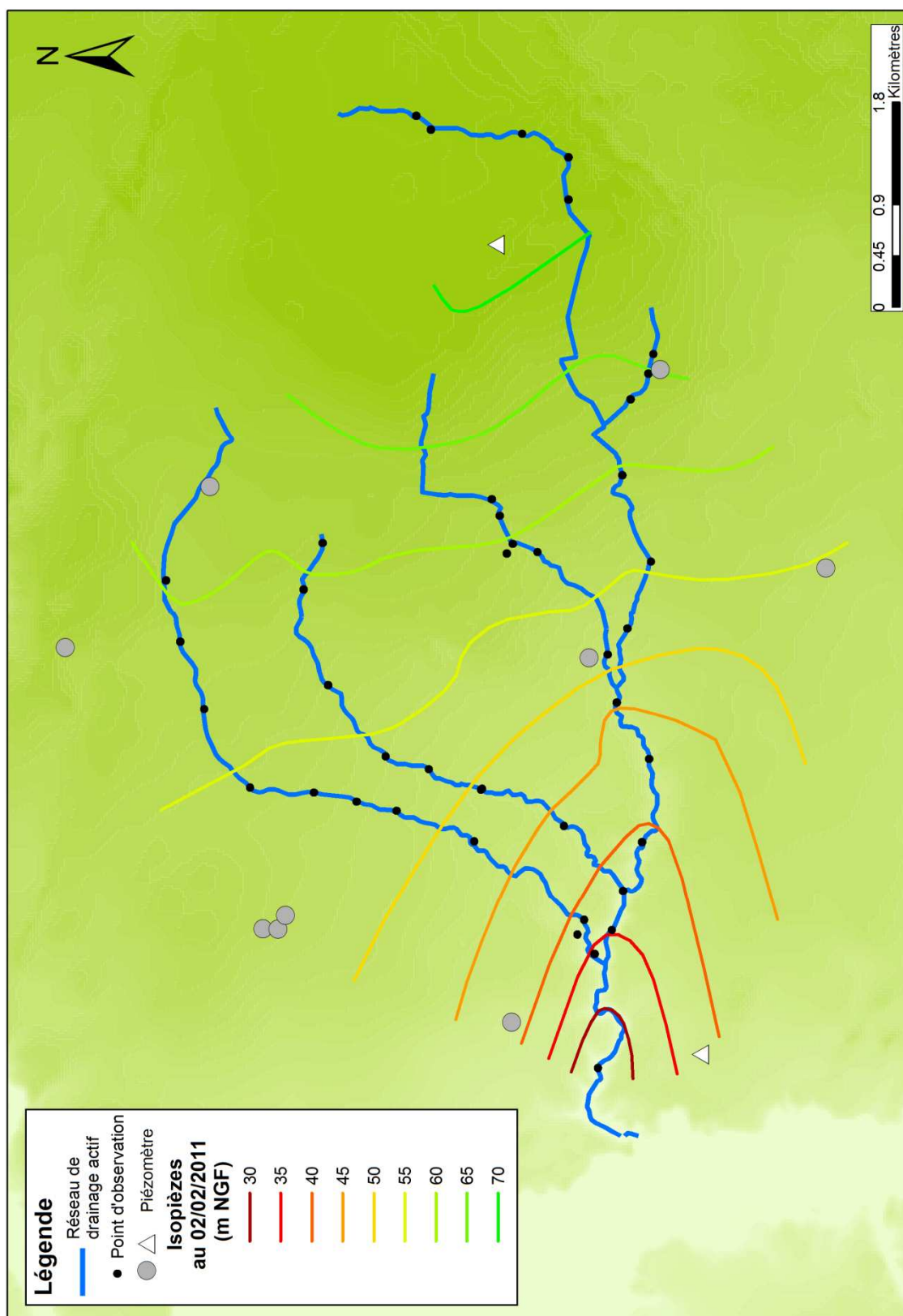


Figure VI-13 : Carte piézométrique en crue, le 02/02/2011, prenant en compte les mesures réalisées dans les piézomètres INRA, BRGM et les mesures de la hauteur d'eau dans la rivière.

6.3.3 En résumé

L'analyse descriptive du système hydrogéologique du bassin versant du Bouron a permis de définir :

- La topographie du substratum (condition aux limites de l'aquifère pour la modélisation hydrogéologique) : sa côte est comprise entre +60 m NGF et -5 m NGF pour le bassin versant du Bouron. Il s'incline du nord au sud et forme un plateau dans la zone nord-ouest du bassin versant.
- La géométrie de l'aquifère, l'épaisseur aquifère et l'épaisseur zone non-saturée : l'aquifère est peu épais sur la partie amont du bassin versant, il s'épaissit en passant à l'ouest, en même temps que la lithologie change vers des faciès plus grossiers (graveleux). L'épaisseur de la zone non saturée est maximum dans la partie nord-ouest et sud-est du bassin versant.
- L'extension du bassin versant hydrogéologique du Bouron : le bassin versant hydrogéologique représente une surface de presque 33 km², contre une surface topographique de 35 km². Les limites choisies pour la modélisation hydrogéologique sont étendues aux cours d'eau environnants (condition aux limites pour l'extension du modèle), afin de limiter les effets de bords.
- Les liens nappe-rivière sur le bassin versant : avec une partie aval où l'influence de la rivière pour le drainage de la nappe est majeure, et une partie amont où l'effet est moins visible sur notre jeu de données. En première approche, seuls les drains de la BD Carthage sont inclus dans la modélisation.

PARTIE 2. Modélisation du système hydrogéologique

6.4 Géométrie et conditions aux limites

6.4.1 Géométrie de l'aquifère modélisé

La modélisation entreprise ne concerne que l'aquifère libre plio-quaternaire, le modèle ne comporte donc qu'une couche. Les limites hydrogéologiques n'étant pas parfaitement définies, variables d'un auteur à l'autre, et pouvant éventuellement même différer d'une année à l'autre, le domaine d'étude a été élargi aux rivières adjacentes, afin de limiter les effets de bords lors de la simulation.

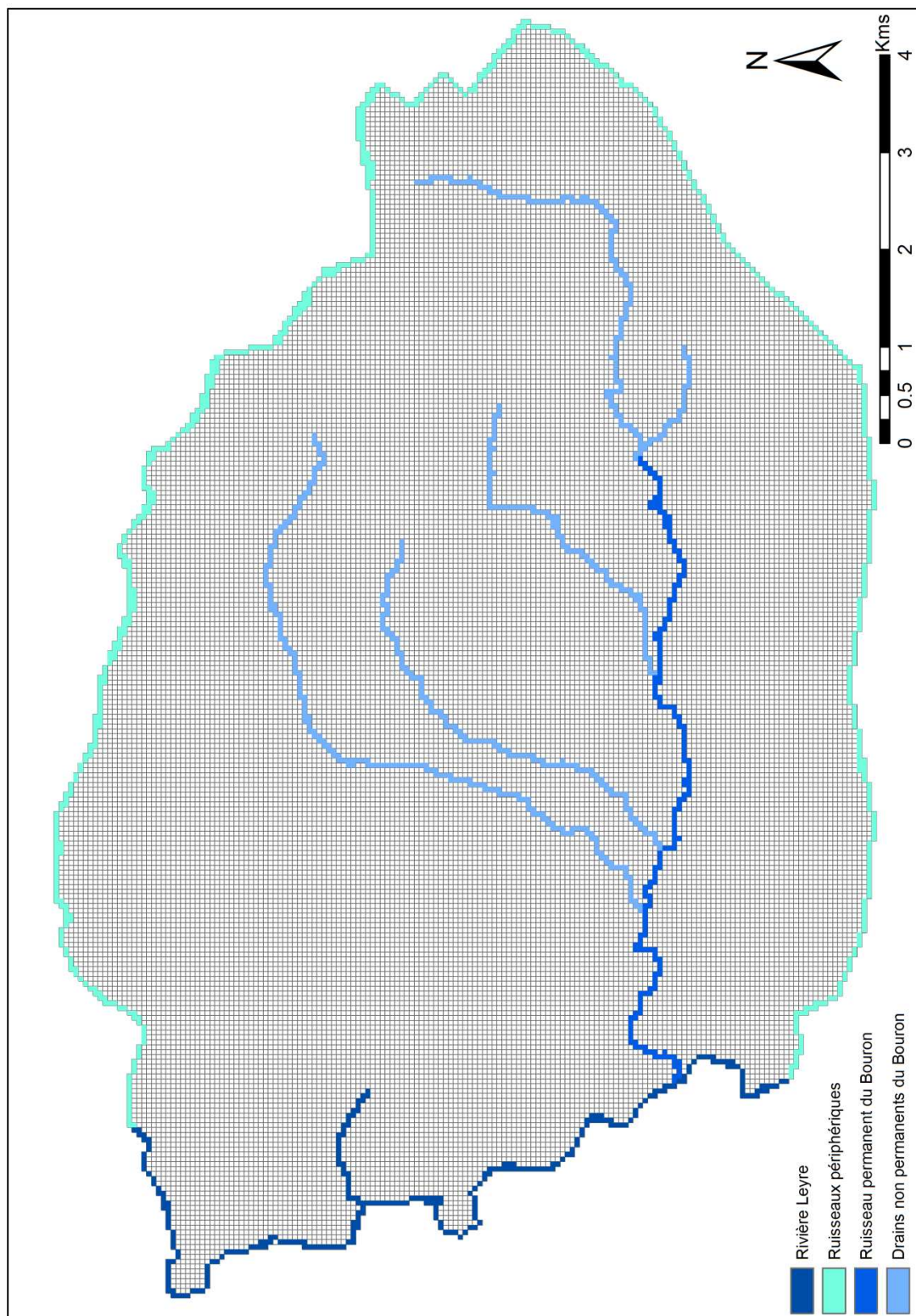
Le domaine est discrétisé en 30343 mailles carrées de dimension de 50*50 m et représente une surface de 75.86 km² (Figure VI-14). Le substratum, ou mur de l'aquifère, utilisé dans le modèle est celui qui a été mis à jour avec les données contemporaines (Partie 1.). Le toit de l'aquifère est issu du modèle numérique de terrain de la BD Topo de l'IGN de résolution 25*25 m et de précision métrique. L'altitude des mailles 50*50 m du modèle correspond à l'altitude moyenne des 4 mailles 25*25 m dont elle est issue (Outil "Data Management - Raster Processing - Resample" d'ArcGIS, par la méthode bilinéaire). Le MNT est ensuite corrigé afin de retirer les cuvettes, i.e. les zones où des mailles ne peuvent pas se déverser dans une maille de moindre altitude (Outil "Spatial Analyst - Fill"). La topographie des mailles rivières est ensuite recorrectée manuellement, afin de prendre en compte les mesures GPS réalisées sur le réseau de drainage (talweg plus creusé, Figure VI-7) par interpolation linéaire de l'altitude mesurée entre deux points d'observation. Ce type de mesure n'étant pas disponible pour les rivières en limite du domaine d'étude, leur altitude a uniquement été contrôlée afin de vérifier la cohérence topographique entre deux mailles voisines et éviter les ruptures de pente.

6.4.2 Calcul de la recharge

Une première méthode pour calculer la recharge ou pluie efficace consiste à réaliser un bilan de type Thornthwaite. L'ETP est d'abord calculée selon la formule décrite au chapitre IV (Eq. 5.6). Puis en considérant que la Réserve Facilement Utilisable (RFU) du sol est connue, le bilan entrées-sorties peut être réalisé, sous l'hypothèse que la pluie entrant dans le système sert, dans l'ordre, d'abord à satisfaire les besoins en ETP, puis à recharger le réservoir non saturé et enfin à recharger le réservoir saturé. Trois valeurs de RFU sont testées, pour représenter une gamme représentative de la variabilité observée dans la région : 75, 100 et 150 mm.

Une seconde méthode pour calculer la recharge du système consiste, elle, à utiliser le modèle GRAECO comme forçage. Ce modèle permet en effet de représenter le volume d'eau restant, après interception par la végétation, évaporation et/ou transpiration par les arbres, le

Figure VI-14 : Conditions aux limites du modèle sur le bassin versant du Bouron



sous-bois et le sol, et rétention dans la zone non saturée. Dans un premier temps, une valeur de pluie efficace est calculée pour chaque année entre 1980 et 2010, pour un peuplement de type Bray de 24 ans (âge pour lequel un inventaire de la biomasse de la parcelle est disponible et qui correspond à l'âge de milieu de rotation, voir chapitre II), avec les paramètres établis et validés pour ce site. Le modèle donne des résultats au pas de temps journalier, qui sont agrégés au pas de temps mensuel. Dans un second temps, des fichiers peuplements sont simulés pour tous les âges de 7 à 60 ans, et une valeur de pluie efficace est calculée pour les années 2010 et 2011 pour chaque âge.

En régime permanent, une recharge spatialement homogène de $0.758 \cdot 10^{-8}$ m/s est appliquée (239 mm/an). Elle correspond à la pluie efficace produisant un débit de $0.2492 \text{ m}^3/\text{s}$ (valeur de débit moyenne observée sur la période 1980-2010) pour la surface du bassin versant hydrogéologique (32.95 km^2). Cette valeur correspond à 26.5 % de la pluie totale, ce qui est en accord avec les valeurs traditionnellement admises pour la région, où l'ETR représente une part très importante des bilans hydriques (Loustau et al., 1999; Moreaux et al., 2011).

En régime transitoire, la recharge Thornthwaite (RFU =100 mm) est utilisée au pas de temps mensuel pour le calage du paramètre S. Une étude de sensibilité aux différentes valeurs de recharge est conduite, au pas de temps mensuel. Au pas de temps journalier, la recharge GRAECO est utilisée : (1) soit en considérant une recharge spatialement homogène pour l'âge moyen du bassin versant, sachant que l'âge moyen des peuplements sur le Bouron en 2008-2009 est de 22.17 ans (d'après les cartes établies au chapitre III), (2) soit en considérant une recharge spatialement homogène proportionnelle à la surface occupée par chaque âge sur le bassin versant (chapitre III).

Afin de reproduire l'effet d'une tempête sur le bassin versant, une recharge a été calculée en augmentant progressivement la surface représentée par les coupes rases. Par exemple, un taux de dégât de 20 % correspond à une augmentation de 20% en surface des coupes rases. Un taux de dégât de 100 % représente un bassin versant sur lequel tous les peuplements correspondent à des coupes rases. Ces surfaces ont été attribuées en diminuant les surfaces occupées par les peuplements de plus de 5 ans, par tirage aléatoire (pas d'hypothèse sur les âges les plus affectés par la tempête).

6.4.3 Autres conditions aux limites

Les conditions aux limites appliquées sont de trois types :

- aux mailles rivières (ruisseau de la Hountasse au nord, ruisseau de la Mounarde au sud et à l'est, rivière Leyre à l'ouest et ruisseau du Bouron) une condition de drain est appliquée. Elle consiste à définir la côte de l'eau en rivière « côte de drain » et le coefficient de transfert qui régule les échanges nappe-rivière ;

- sur les autres mailles est appliquée en surface une condition de flux imposé surfacique pouvant être positif lorsque la nappe est rechargée par la pluie efficace ou négatif lorsque la végétation prélève dans la nappe ;
- à la limite inférieure et sur les autres mailles situées en bordure du domaine (hors mailles rivières) une condition de flux nul est appliquée par défaut.

En régime permanent, la côte de drain appliquée est celle observée le 2 février 2011. La distribution de la transmissivité et celle du coefficient de transfert sont calées par la méthode essai-erreur afin de restituer d'une part le débit moyen mesuré à l'exutoire du Bouron et d'autre part la piézométrie observée aux points de mesure. L'hiver 2011 n'ayant pas conduit à une recharge complète de l'aquifère, la carte piézométrique établie à cette date, plus fiable car disposant d'un grand nombre d'observations (piézomètres et côte en rivière), peut être considérée comme une carte représentative d'une piézométrie moyenne. Elle sera utilisée afin de comparer piézométrie simulée/observée, et de valider les valeurs de T choisies.

Le coefficient de transfert des mailles rivières est défini en fonction du type de rivière. D'après les travaux de Chossat J.C. (Campagne, 1997), la conductivité hydraulique du lit des rivières est égal à $3.47 \cdot 10^{-5}$ m/s (mesuré à l'infiltromètre à disque). En considérant que le réseau permanent du Bouron fait en moyenne 2 m de large et que le réseau temporaire fait en moyenne 0.3 m de large, le coefficient de transfert initialement fixé pour ces mailles est compris entre $3 \cdot 10^{-3}$ m³/s et $5 \cdot 10^{-4}$ m³/s respectivement. Pour la Leyre, il est fixé à $17 \cdot 10^{-3}$ m³/s, en faisant l'hypothèse d'une largeur de 10 m. Enfin, pour les ruisseaux en bordure de la zone d'étude, ce coefficient est égal à $3 \cdot 10^{-3}$ m³/s, sous l'hypothèse que ces cours d'eau aient la même morphologie que le réseau permanent du Bouron. Lorsque la nappe et la rivière ne sont plus connectées hydrauliquement (présence d'une zone non saturée), le débit d'échange rivière-nappe est fixé à zéro pour les drains non permanent du Bouron ($Q_0=0$), afin de ne pas créer une recharge erronée de la nappe en période d'étiage. Pour vérifier la qualité de la simulation, quatre zones de bilan sont utilisées pour calculer : (1) les débits de la Leyre sur sa portion modélisée (191 mailles), (2) les débits des ruisseaux périphériques (699 mailles), et enfin (3) le débit du Bouron, avant la station de jaugeage du Moulin du Moine, dans son intégralité (751 mailles) ou (4) uniquement sur sa partie permanente (171 mailles). Le débit moyen du Bouron pour la période 1980-2010 est comparé aux sorties du modèle NEWSAM pour la zone de bilan permanente du Bouron afin de contrôler la bonne représentation du transfert dans les mailles rivières.

En régime transitoire, le modèle est initialisé avec les valeurs de charges hydrauliques calculées en régime permanent (voir ci-dessus). La simulation transitoire sur 20 ans (01 janvier 1980 au 31 décembre 2010) au pas de temps mensuel permet de caler la distribution spatiale du coefficient d'emménagement par la méthode essai-erreur. Le résultat de la simulation est évalué en comparant la dynamique piézométrique sur la période où les données

mesurées in-situ sont disponibles. De même, les débits simulés sont comparés aux débits mesurés à l'exutoire du Bouron.

La simulation en régime transitoire au pas de temps journalier sur deux années hydrologiques est initialisée en juin 2009. Cette simulation permet de faire des tests de sensibilité du modèle à la recharge. La méthode de calcul de cette dernière est décrite au chapitre 6.4.2.

6.4.4 Exploitation des résultats

L'utilisation de l'interface graphique CoMet (Ecole des Mines de Paris) a permis de vérifier les résultats durant la phase de calage du modèle.

Lorsque le résultat a été jugé satisfaisant, le traitement des fichiers de sortie NEWSAM ont été mis en forme sous R : (1) transformation en fichier ASCII et création de l'en-tête adaptée pour l'importation sous ArcGIS, (2) extraction des résultats de type bilan global, bilan par zone et drainage, et (3) création des graphiques de résultats.

L'exportation sous ArcGIS a permis la superposition des différentes couches d'information géographique.

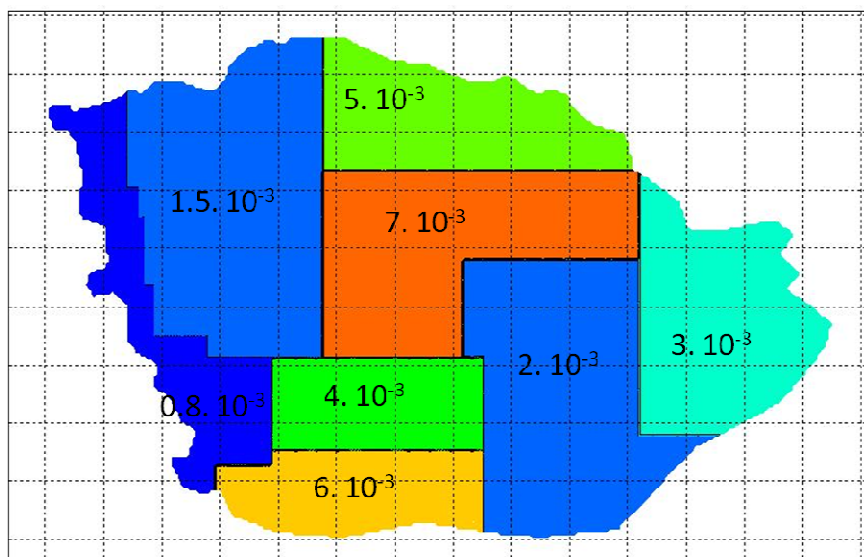


Figure VI-15 : Répartition spatiale du paramètre transmissivité T, en m²/s (Visualisation CoMet).

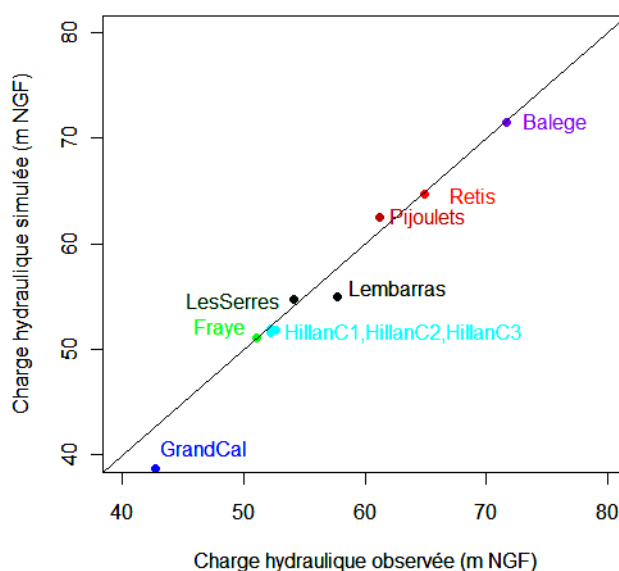


Figure VI-16 : Correspondance entre piézométrie mesurée et piézométrie simulée par NEWSAM.

Tableau VI-1 : Bilan hydrologique pour l'ensemble du modèle, pour la rivière du Bourron, les rivières périphériques et le tronçon de Leyre représenté sur le modèle. La recharge correspond à la quantité d'eau appliquée sur l'ensemble des mailles, la décharge correspond au cumul des débits calculé sur toutes les mailles rivières.

	Entrées (mm/an)	Sorties (mm/an)	Erreur (mm/an)
Recharge/Décharge	239.08	238.99	0.08
Débit de base Bourron	-5.94	107.92	0.00
Débit de base rivières périphériques	-6.07	79.32	0.17
Débit de base rivière Leyre	-1.50	46.44	0.00

6.5 Modélisation en régime permanent

Lors du calage en régime permanent, un zonage des transmissivités a été réalisé (Figure VI-15). Les valeurs s'échelonnent entre 8.10^{-4} et $7.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Leur répartition spatiale correspond bien à la répartition des épaisseurs de l'aquifère (rappel : transmissivité (T) = perméabilité (K) * épaisseur (e)). En effet, les valeurs les plus fortes se retrouvent le long de l'axe Nord-Est/Sud-Ouest, là où la puissance de l'aquifère est la plus importante. Les valeurs utilisées dans cette modélisation sont dans la gamme des valeurs observées par Corbier et Karnay (2010) pour T : de $0.54. 10^{-3}$ à $2.6. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

La piézométrie est relativement bien représentée spatialement (Figure VI-17A), avec en moyenne - 1.077 m d'écart entre la côte mesurée et la côte modélisée (Figure VI-16), ce qui est en accord avec la précision générale des valeurs en entrée du modèle (côte de l'eau dans les rivières, MNT). Les valeurs les plus discordantes sont rencontrées le long de la limite Ouest du modèle, pour les sites de Lembarras, Hillan, GrandCal et Boutox, sites pour lesquels le tracé de la carte piézométrique est le moins fiable (nombre limité d'observations). Pour ces sites, la différence de côte est au maximum de 3.9 m (site de GrandCal).

Cependant, les paramètres permettant de juger de la qualité générale de la simulation sont relativement bons. Le bilan hydrologique est très correct : le système aquifère reçoit $0.5751 \text{ m}^3/\text{s}$ de recharge et $0.5749 \text{ m}^3/\text{s}$ sont drainés, soit une erreur totale de $0.1988.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (Tableau VI-1). Le débit moyen du Bouron est correctement estimé : le modèle donne $0.2596 \text{ m}^3/\text{s}$, contre $0.2492 \text{ m}^3/\text{s}$ mesuré, soit une erreur 10 mm/an.

La côte imposée en rivière est relativement bien respectée le long du Bouron (Figure VI-17C), la différence est le plus souvent comprise entre -1 et 1 mètre (dans 95% des cas). En revanche, ce n'est pas le cas des rivières périphériques, qui présentent des écarts importants pouvant atteindre -3 à 2 m. Le débit calculé aux mailles rivières (Figure VI-17B) est négatif lorsque la rivière draine la nappe (l'eau sort du système aquifère). Il est positif lorsque la rivière alimente la nappe (l'eau rentre dans le système aquifère). Sur le Bouron, la rivière draine la nappe sur toute sa partie aval et en particulier sur le tronçon correspondant au ruisseau de la Hountasse. Les drains situés en amont du réseau permanent sont peu contributifs à l'écoulement de surface avec des valeurs de débit proche de zéro. Les valeurs extrêmes, positives et négatives, sont souvent trouvées pour les rivières périphériques, et leur répartition spatiale est peu cohérente, ce qui indique que la valeur de côte de drain imposée n'est probablement pas réaliste.

Le système ne présente pas d'état d'équilibre, ce qui rend très complexe sa calibration. Les tests conduits durant cette phase de calibration montrent que les simulations dépendent peu de la distribution de T . En effet, une simulation avec une valeur de transmissivité homogène ($6.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) sur la zone donne déjà des résultats qui se trouvent dans la gamme des

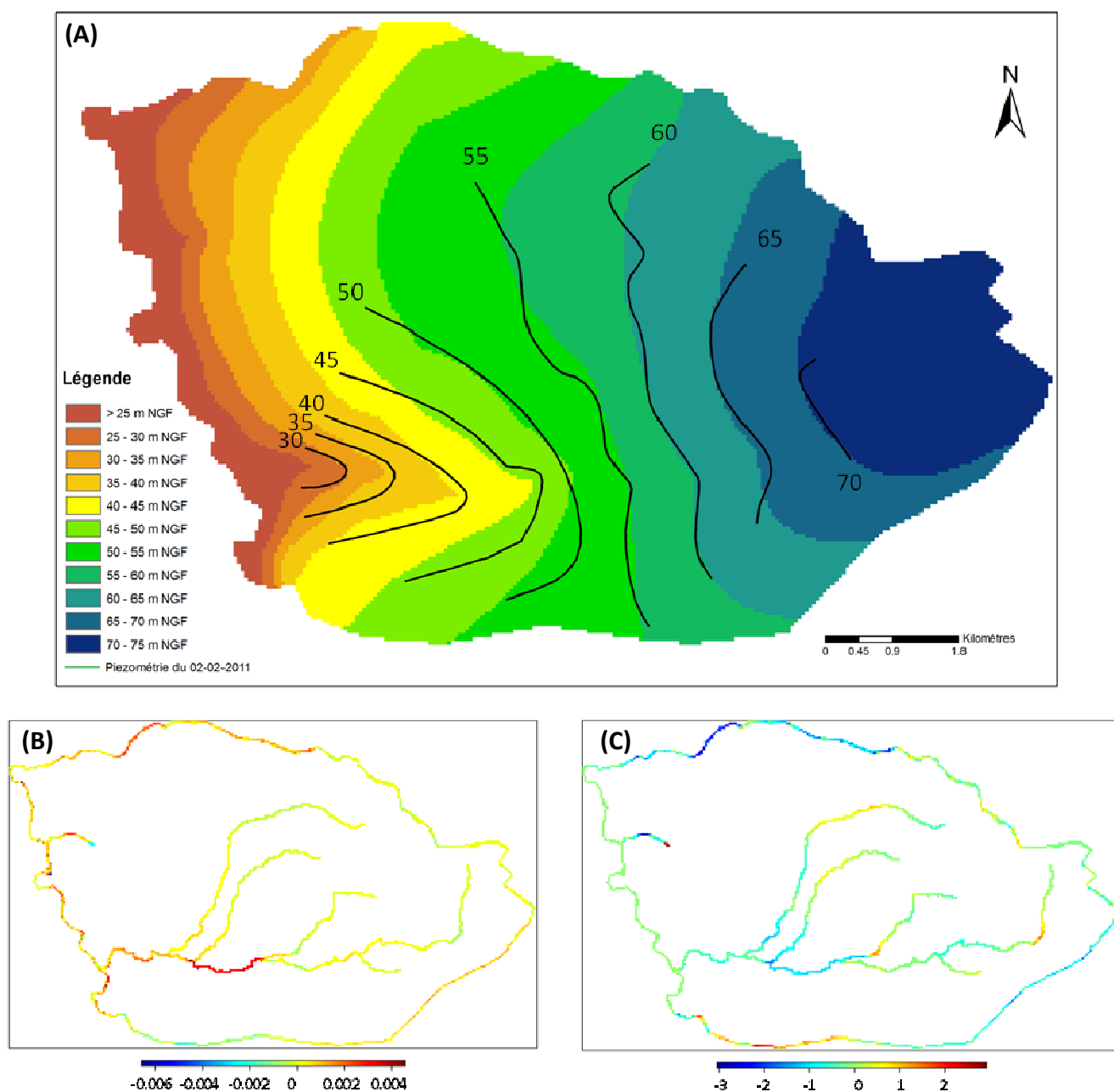


Figure VI-17 : Résultats de la simulation en régime permanent: (A) Charges hydrauliques simulées et charges hydrauliques observées en février 2011, (B) Débit de chaque maille rivière (en m³/s), (C) différence entre cote imposée et cote calculée aux mailles rivière (en mètres).

charges hydrauliques observées in situ, et qui sont relativement bien réparties spatialement sur le modèle. Le manque d'information sur les rivières en bordure du modèle et de piézomètres dans la zone Nord-Ouest est une limite sérieuse à la réussite d'un calage fin du régime permanent. Le choix d'imposer des côtes proches du MNT, faute d'informations plus détaillées est discutable. En effet, les altitudes mesurées dans le talweg du Bouron se sont révélées plus faibles que celles données par le MNT (voir paragraphe 6.2.2.1), et il est très probable que cela soit aussi le cas pour les rivières périphériques.

Le modèle est en revanche très sensible à la recharge. Si celle-ci est surestimée, en régime permanent, il est impossible de retrouver à la fois le bon débit à l'exutoire et la bonne piézométrie. Le coefficient de transfert vers les drains est aussi un paramètre clef, qui, s'il est mal ajusté, peut conduire très rapidement à des charges hydrauliques calculées dépassant la topographie de plusieurs mètres.

6.6 Modélisation en régime transitoire

6.6.1 De long terme, 10 ans au pas de temps mensuel

En régime transitoire au pas de temps mensuel, la recharge Thornthwaite, avec une RFU de 100 mm, a été utilisée pour le calage du coefficient d'emménagement (S) pour la période 1980 à 2010. Les valeurs de S obtenues s'échelonnent entre $3 \cdot 10^{-2}$ et $30 \cdot 10^{-2}$ [-]. La localisation des valeurs de S choisies semble être une combinaison de différents facteurs. Le type de substrat est déterminant, avec les valeurs les plus importantes de S qui se retrouvent dans les zones où la lithologie est la plus grossière (graviers). Cependant, afin d'avoir une bonne représentation de la dynamique piézométrique, ce paramètre a aussi permis de créer un amortissement du signal, qui peut être davantage relié à l'épaisseur de la zone non saturée subjacente. Ces valeurs sont supérieures aux valeurs données par Corbier et Karnay (2010), qui retenait une valeur de $2.55 \cdot 10^{-3}$ pour la formation NF. Le manque de valeurs chiffrées sur les autres formations, qui sont les plus importantes en puissance sur le bassin versant, ne permet pas de déterminer si les coefficients prescrits sont hors gamme.

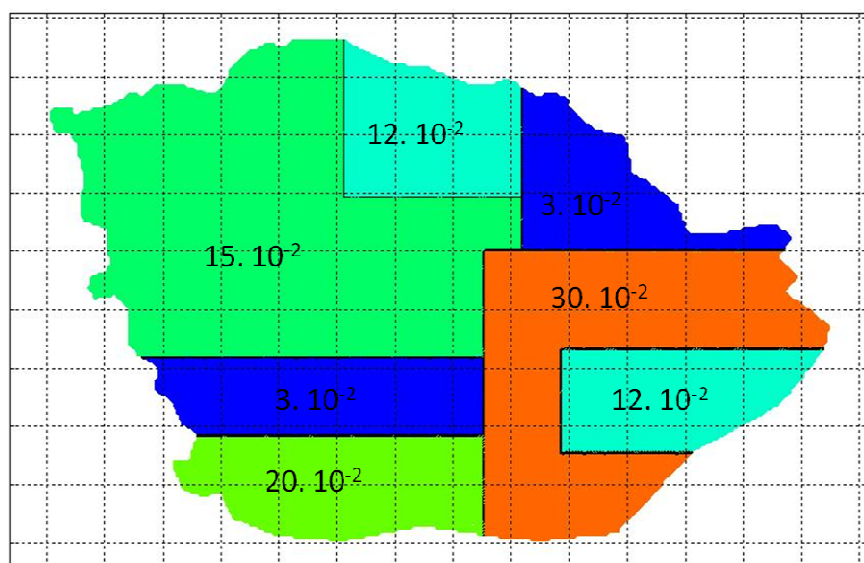


Figure VI-18 : Répartition spatiale du paramètre S, sans unité (Visualisation CoMet).

L'erreur moyenne entre les charges hydrauliques mesurées et observées sur la période de simulation est plus faible que lors du régime permanent. Elle est en moyenne de -0.71 mètre, et la différence la plus forte est de -2.98 mètres pour les sites de GrandCal et de Fraye. La temporalité des pics piézométriques et leur amplitude sont relativement bien reproduites pour les piézomètres de Balège, GrandCal, Hillan et La Serre (Figure VI-19). Pour les piézomètres de Lembarras et des Pijoulets, les chroniques sont décalées dans le temps, probablement en raison d'un effet de retard du signal pluie efficace, amorti par la zone non saturée, non représentée dans le modèle. Pour les piézomètres de Fraye, de Retis et des

Pijoulets s'ajoute la proximité au drain, qui conditionne trop fortement la charge hydraulique localement (Figure VI-19). Les débits sont relativement bien simulés au cours de la période d'étude : ils sont dans la gamme des débits observés pour la zone d'étude. Les débits d'étiage sont cependant surestimés et certaines années, des pics de crues trop importants sont simulés.

L'analyse des données de bilan hydrologique global montre une bonne concordance entre injection et drainage pour une année hydrologique, avec un stockage faible (Tableau VI-3). L'erreur commise est en moyenne de 20 mm, ce qui est faible en regard de la recharge (en moyenne 320 mm).

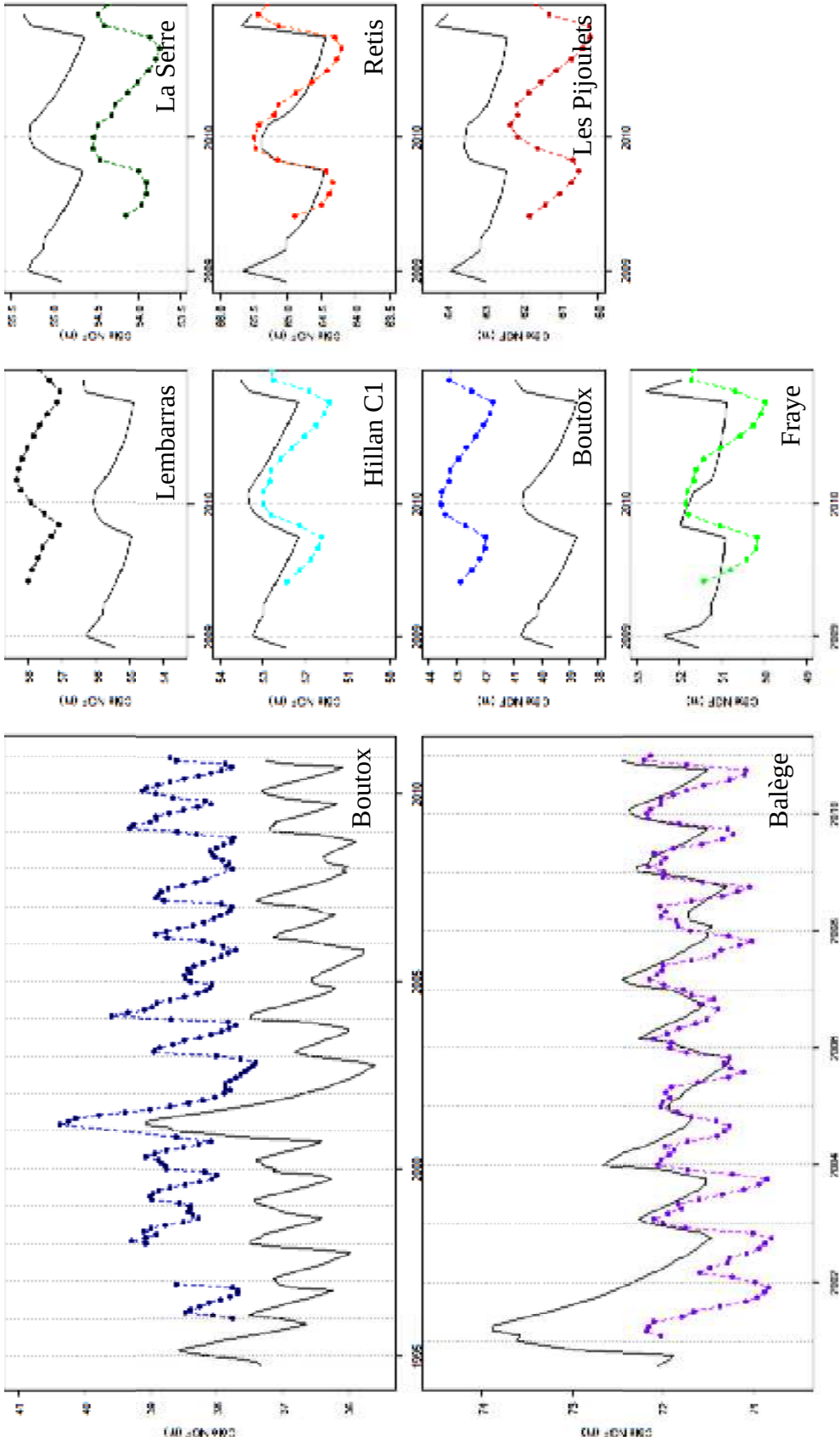
Le régime transitoire est initialisé à partir du régime permanent. La simulation commence en 1980 et se termine en 2010. Les premières données hydrologiques disponibles sont les mesures de débits (depuis 1969) ; les données piézométriques les plus anciennes datent de 1995. Par conséquent, l'effet de l'initialisation n'est pas visible sur les données piézométriques (Figure VI-19, pour le site de Boutox). Le temps de convergence semble court au vu de la comparaison des débits mesurés et des débits simulés (Figure VI-20).

Comme cela a déjà été remarqué lors de l'analyse des résultats du régime permanent, la recharge est le facteur déterminant pour simuler correctement le fonctionnement de l'aquifère sur la zone d'étude. La variabilité spatiale des événements pluvieux pourrait être responsable d'une partie des écarts observés. Cependant, la zone d'étude est peu étendue (13.2 km en latitude, et 8.5 km en longitude). De plus, la comparaison des données SAFRAN, entre les 9 points de la grille (espacés de 8 km) les plus proches du bassin versant a relevé un écart moyen annuel de 8% (Dayau, S., communication personnelle). Le mauvais accord local entre simulation et modélisation est donc lié à la reprise évapotranspiratoire.

Un test de sensibilité réalisé à partir de différentes valeurs de recharge (bilan Thornthwaite avec des valeurs différentes de RFU et recharge GRAECO) met clairement en évidence la liaison entre dynamique de nappe et recharge appliquée, toutes conditions étant égales par ailleurs (

Figure VI-21). Les sorties de simulation sont relativement similaires, en terme de dynamique, pour un même type de recharge entre Balège et Boutox, alors que les chroniques piézométriques sont très différentes. Il faut cependant noter que plus la RFU est importante, plus la recharge estimée est faible les années où le déficit pluviométrique est fort. Ainsi, avec la recharge Thornthwaite, calculée avec une RFU de 150 mm, il est fréquent que la recharge hivernale soit nulle, entraînant une vidange du système sur deux années consécutives (2001-2002, 2004-2005, 2007-2008).

Figure VI-19 : Comparaison des charges hydrauliques simulées (trait noir continu) et mesurées (ligne pointillée de couleur), au pas de temps mensuel, extraits présentés entre 1995 et 2010 (graphiques de gauche) et 2009-2010 (graphiques de droite). Les Pijoulets, Retis et Fraye sont situés à proximité d'un drain, les autres piézomètres sont situés dans des interfluvés.



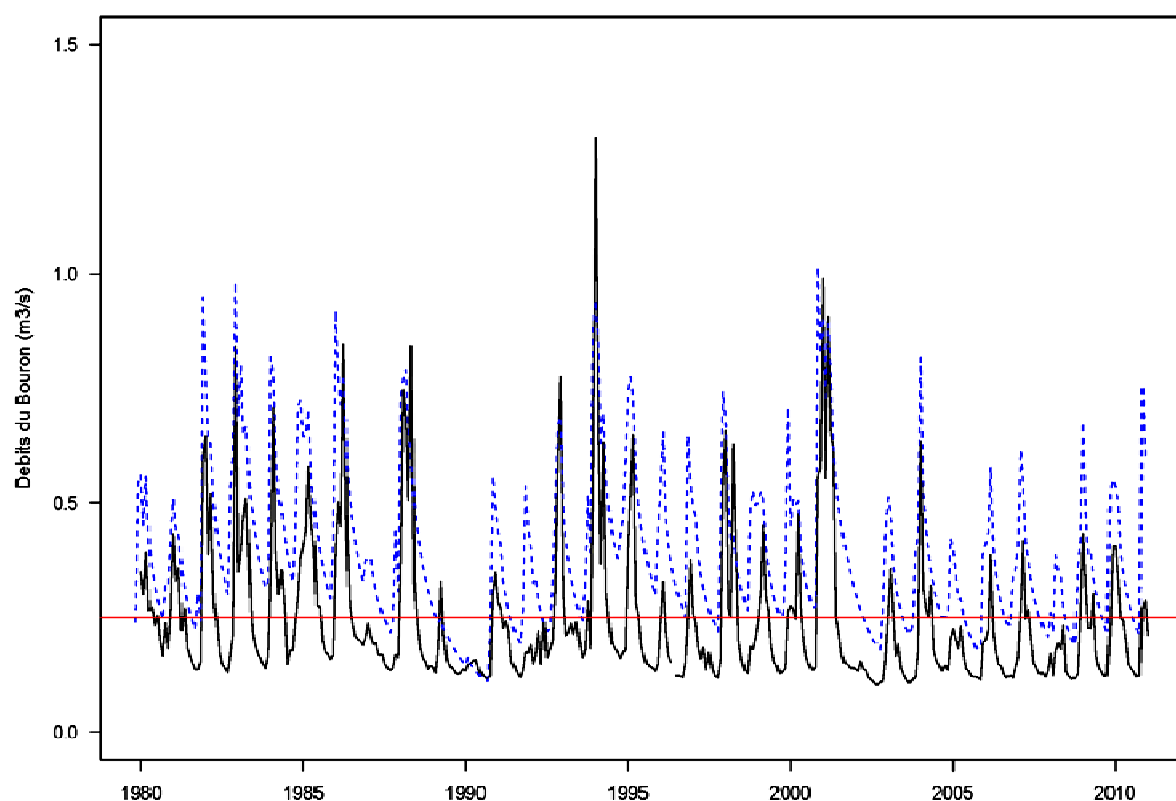


Figure VI-20 : Comparaison des débits simulés (bleus) et des débits observés (noir) à l'exutoire du Bouron au pas de temps mensuel. Le trait rouge symbolise le débit moyen sur la période.

Tableau VI-2 : Erreurs commises par les différentes simulations : biais (erreur systématique en mètre) et dispersion (erreur non systématique en mètre), en fonction de la recharge appliquée au modèle, soit issue du modèle GRAECO, soit issue du bilan Thornthwaite (T) avec une RFU variable (75, 100 ou 150).

	Balège		Boutox	
	Biais	Dispersion	Biais	Dispersion
Thw_100	0,34 ± 0,37	0,48 ± 0,77	1,73 ± 0,30	0,33 ± 0,42
Thw_75	0,67 ± 0,47	0,47 ± 0,69	1,51 ± 0,40	0,35 ± 0,41
Thw_150	0,40 ± 0,39	0,57 ± 0,77	2,28 ± 0,54	0,44 ± 0,52
GRAECO	0,74 ± 0,65	0,34 ± 0,60	1,52 ± 1,10	0,43 ± 0,63

Tableau VI-3 : Bilan hydrologique annuel sur la zone simulée pour une recharge issue du bilan Thornthwaite (Thw) avec une RFU de 100 mm.

	Pluviométrie totale mesurée (mm)	Recharge Thornthwaite (mm)	Ratio Pluie efficace / Pluie totale (%)	Decharge NEWSAM (mm)	Stockage NEWSAM (mm)	Erreur (mm)
1980	855.3	270.8	31.7	303.2	-20.1	12.3
1981	971.0	452.3	46.6	409.6	67.9	25.2
1982	1182.0	565.4	47.8	497.6	77.0	9.2
1983	995.0	339.3	34.1	405.8	-38.9	27.5
1984	965.7	458.3	47.5	455.5	14.1	11.3
1985	1017.4	476.9	46.9	461.2	35.0	19.3
1986	707.6	103.2	14.6	282.8	-156.1	23.5
1987	1165.1	544.3	46.7	435.2	115.2	6.1
1988	704.3	17.6	2.5	233.1	-177.7	37.8
1989	669.5	21.0	3.1	144.9	-92.6	31.3
1990	898.1	305.3	34.0	280.5	50.4	25.6
1991	1016.1	257.7	25.4	275.3	2.1	19.8
1992	1127.0	370.8	32.9	355.3	29.9	14.4
1993	1269.9	633.8	49.9	501.5	139.5	7.2
1994	984.8	443.3	45.0	453.3	-4.2	5.9
1995	899.2	244.3	27.2	345.1	-78.2	22.6
1996	962.7	239.3	24.9	326.5	-54.5	32.7
1997	1012.5	353.0	34.9	360.4	17.6	25.0
1998	892.7	330.2	37.0	358.4	-8.1	20.1
1999	887.2	349.5	39.4	355.2	7.6	13.3
2000	1294.4	657.6	50.8	544.9	130.3	17.5
2001	599.4	0.0	0.0	251.0	-208.6	42.5
2002	845.0	259.0	30.7	280.6	-5.4	16.2
2003	953.5	356.0	37.3	341.5	26.9	12.4
2004	635.8	152.2	23.9	253.6	-67.2	34.2
2005	955.2	319.5	33.4	294.3	32.1	7.0
2006	976.5	323.7	33.1	323.5	13.1	12.9
2007	851.7	144.3	16.9	239.0	-62.8	32.0
2008	1037.6	317.8	30.6	312.0	26.3	20.4
2009	786.4	282.5	35.9	318.8	-12.3	24.0
MOYENNE	937.3	319.6	32.2	346.7	-6.7	20.3

D'après la carte des coupes rases de l'IFN (chapitre III), le site de Balège a été exploité en 2004-2005. Son âge peut être estimé à 5-7 ans en 2011. Le site de Boutox est passé en coupe rase en 1997-1998 (ce qui correspond à la période d'interruption des mesures). Son âge est donc compris entre 12 et 14 ans. Le site de Balège est caractérisé par une nappe plutôt superficielle et il se trouve en amont du bassin versant. La nappe au site de Boutox est plus profonde (épaisseur de la zone non saturée d'environ 3m), ce piézomètre se trouve à proximité de l'exutoire du Bouron. Le changement de dynamique pour le site de Balège après l'année 2004, avec des oscillations moins importantes et un étiage moins prononcé, ne semble cependant pas pouvoir être relié à la mise en place d'un jeune peuplement, puisque le même phénomène est visible à Boutox. En revanche, pour les années où la recharge de l'aquifère est un facteur limitant (par exemple 2002, 2005 et 2008), l'effet est moins marqué si le piézomètre est superficiel. Au site de Balège, les années 2005 et 2008 sont à peine marquées par le défaut de recharge par rapport aux autres années.

Pour les piézomètres de Balège et de Boutox, dont les chroniques temporelles des mesures sont les plus longues, la qualité des simulations résultantes a pu être estimée (Tableau VI-2). A Balège, la simulation qui minimise le biais est la simulation avec une recharge Thornthwaite et une RFU de 100 mm ; tandis que celle qui explique le mieux la variabilité (moins de dispersion) est la simulation obtenue avec une recharge GRAECO. A Boutox, les simulations avec une recharge Thornthwaite et une RFU de 75 mm ou avec une recharge GRAECO donnent les meilleurs résultats, avec le biais le plus faible. En revanche, ce sont les simulations avec une recharge Thornthwaite et une RFU de 100 et de 75 mm qui minimisent l'erreur non systématique.

L'application d'une recharge homogène sur l'ensemble du bassin versant est peu réaliste et la prise en compte de l'épaisseur de la zone non saturée semble être un critère déterminant pour expliquer la diversité des réponses à l'évènement recharge.

6.6.2 De court terme, 2 ans au pas de temps journalier

L'utilisation des coefficients d'emmagasinement calibrés durant le transitoire au pas de temps mensuel révèle que le stockage-déstockage n'est pas bien simulé au pas de temps journalier. Cela s'explique par le fait que les valeurs de piézométrie ayant servi à la calibration de S correspondent à des moyennes mensuelles et donc à un signal piézométrique lissé. La distribution spatiale n'a pas été modifiée mais les valeurs de S ont été légèrement corrigées pour cette simulation. Elles s'échelonnent entre $3.0 \cdot 10^{-2}$ et $17.0 \cdot 10^{-2}$ [-]. Les modifications ont porté principalement sur la zone amont du Bouron, et sur l'interfluve Nord-Ouest (Figure VI-22).

L'utilisation de GRAECO en omettant les prélèvements par la végétation (jamais de recharge négative) conduit à des résultats de simulation souvent moins bons, par rapport à une

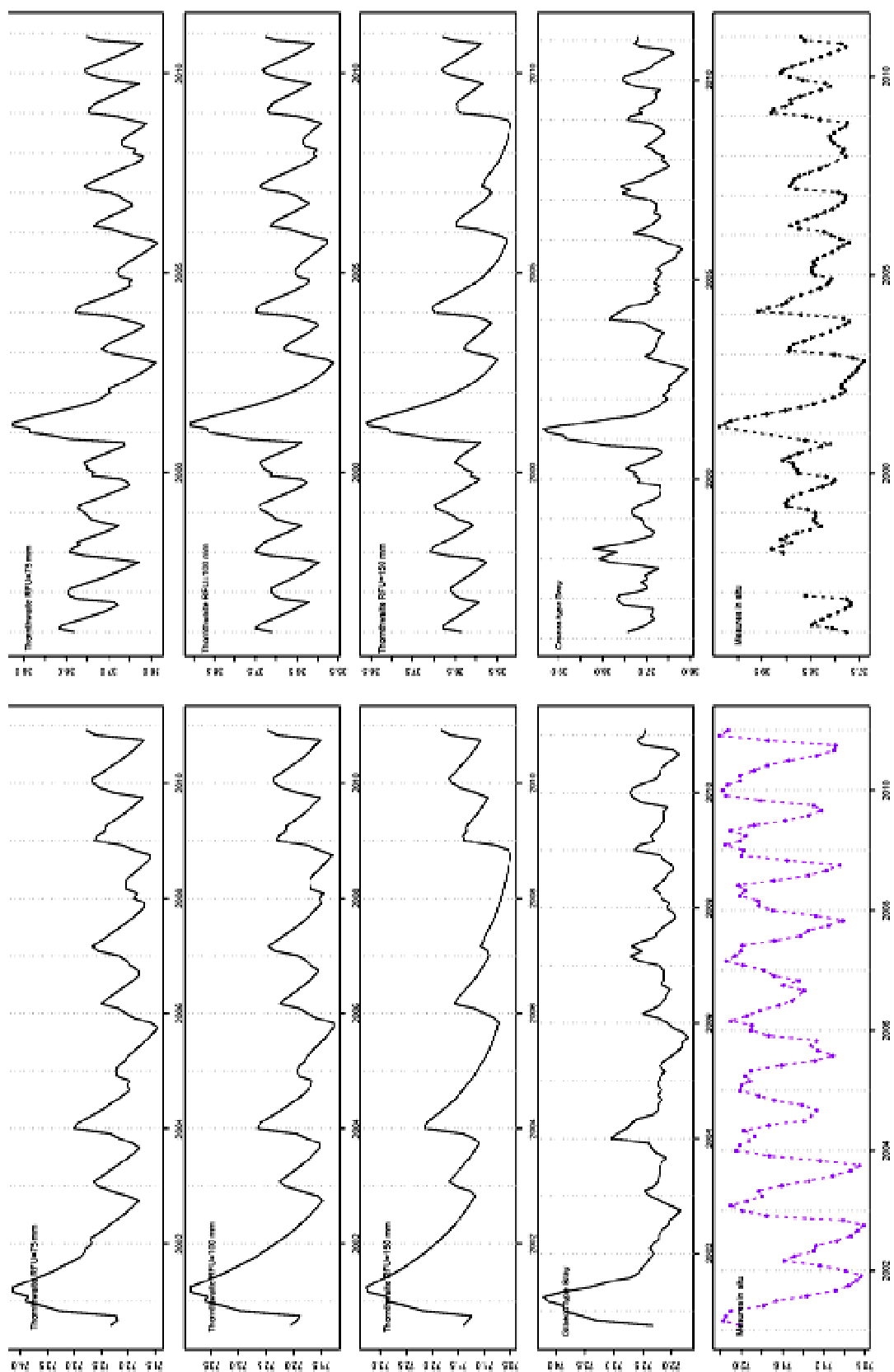


Figure VI-21 : Test de sensibilité à la recharge, simulation au pas de temps mensuel sur la période 1980-2010. Les courbes en trait plein correspondent aux résultats de simulation, les courbes du bas (pointillées) correspondent aux mesures.

simulation dans laquelle ces prélèvements sont pris en compte (Tableau VI-4), sauf pour les piézomètres de GrandCal et de Lembarras. Cette particularité peut être soit due à une mauvaise représentation du système localement dans le modèle, soit liée à un fonctionnement végétation-nappe particulier. Le site de Balège est celui pour lequel le gain est le plus important (réduction du biais notamment) en prenant en compte les prélèvements (Tableau VI-4).

La piézométrie est représentée pour la simulation dans laquelle la recharge est proportionnelle à la surface représentée par chaque âge sur le bassin versant, avec les prélèvements par la végétation (G_PropA_AcP), en Figure VI-23. La plupart des limites observées au pas de temps mensuel sont aussi valables au pas de temps journalier : mauvaise simulation de la piézométrie aux points proches d'une maille rivière (Fraye et Les Pijoulets).

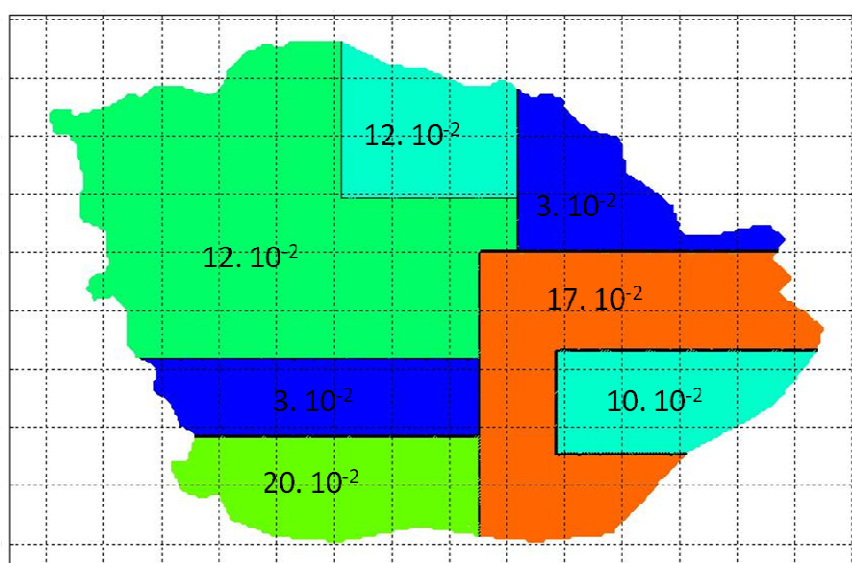


Figure VI-22 : Nouvelles valeurs du paramètre S pour les simulations au pas de temps journalier, sans unité (Visualisation CoMet).

Tableau VI-4 : Erreurs commises par les différentes simulations : biais (erreur systématique en mètre) et dispersion (erreur non systématique en mètre), en fonction de la recharge appliquée au modèle, issue du modèle GRAECO, soit pour un peuplement de 24 ans (milieu de rotation, code M), soit pour l'âge moyen des peuplements sur le bassin versant (22 ans, code AgeM), soit proportionnelle à la surface représentée par chaque âge sur le bassin versant (code PropA).

	G_M_SP		G_M_AP		G_AgeM_AP		G_AgeM_AP		G_PropA_AP	
	Biais	Dispersion	Biais	Dispersion	Biais	Dispersion	Biais	Dispersion	Biais	Dispersion
Fraye	0,64 ± 0,67	0,36 ± 0,56	0,54 ± 0,53	0,34 ± 0,51	0,65 ± 0,68	0,36 ± 0,56	0,54 ± 0,55	0,40 ± 0,61	0,51 ± 0,47	0,39 ± 0,60
Grand Cal	2,76 ± 0,14	5,01 ± 1,80	1,46 ± 0,48	5,13 ± 1,53	2,20 ± 0,20	0,33 ± 0,35	3,34 ± 0,30	0,33 ± 0,37	3,49 ± 0,46	0,26 ± 0,30
Hillan C1	1,06 ± 0,54	0,46 ± 0,51	0,45 ± 0,38	0,19 ± 0,21	1,10 ± 0,55	0,47 ± 0,52	0,17 ± 0,17	0,32 ± 0,32	0,29 ± 0,27	0,23 ± 0,25
Lembarras	1,89 ± 0,76	0,37 ± 0,38	2,55 ± 1,12	0,35 ± 0,34	1,87 ± 0,75	0,37 ± 0,38	2,39 ± 1,06	0,42 ± 0,41	2,46 ± 1,07	0,38 ± 0,37
La Serre	1,19 ± 0,33	0,14 ± 0,18	0,69 ± 0,30	0,09 ± 0,12	1,21 ± 0,33	0,15 ± 0,19	0,80 ± 0,26	0,13 ± 0,16	0,74 ± 0,27	0,10 ± 0,13
Les Pijoulets	2,10 ± 1,20	0,48 ± 0,65	7,00 ± 2,56	5,47 ± 2,16	2,11 ± 1,19	0,48 ± 0,65	1,73 ± 1,23	0,53 ± 0,68	1,66 ± 1,19	0,49 ± 0,63
Retis	0,42 ± 0,32	0,09 ± 0,11	0,21 ± 0,21	0,11 ± 0,13	0,15 ± 0,15	0,35 ± 0,25	0,14 ± 0,12	0,13 ± 0,16	0,16 ± 0,14	0,12 ± 0,14
Boutox	1,20 ± 0,53	0,22 ± 0,29	2,00 ± 0,81	0,17 ± 0,22	1,19 ± 0,52	0,22 ± 0,29	1,83 ± 0,68	0,23 ± 0,29	0,71 ± 0,00	0,25 ± 0,00
Balège	0,84 ± 0,18	0,20 ± 0,23	0,09 ± 0,08	0,12 ± 0,11	0,86 ± 0,17	0,21 ± 0,23	0,13 ± 0,06	0,18 ± 0,16	0,07 ± 0,07	0,14 ± 0,13
MOYENNE	1,35 ± 0,52	0,81 ± 0,52	1,66 ± 0,72	1,33 ± 0,59	1,26 ± 0,50	0,32 ± 0,38	1,23 ± 0,49	0,30 ± 0,35	1,12 ± 0,44	0,26 ± 0,28

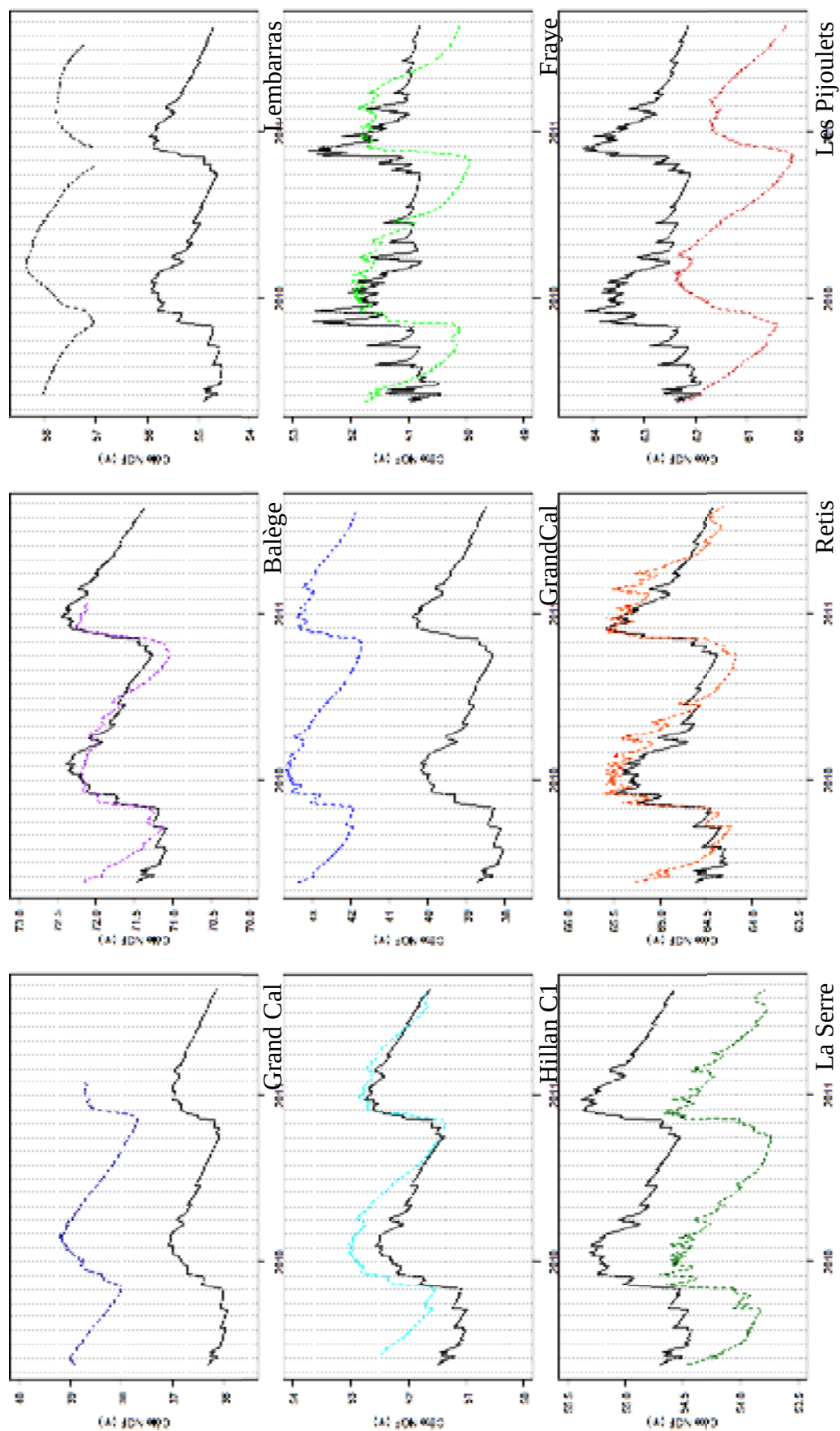


Figure VI-23 : Comparaison des charges hydrauliques simulées (trait noir continu) et mesurées (ligne pointillée de couleur), au pas de temps journalier.

mauvaise représentation temporelle de la recharge pour les sites où la zone non saturée est d'épaisseur importante et mauvais résultats pour les sites déjà problématiques car en limite de la carte piézométrique (Grand Cal en particulier). Le pic de crue observé en 2011 sur les piézomètres, de moindre amplitude que celui de 2010 est rarement bien simulé. En revanche, le raccourcissement de phase des oscillations annuelles est bien reproduit, bien qu'en règle générale, celle-ci soit toujours plus faible que la phase observée.

Les résultats du bilan hydrologique annuel sont en accord avec ceux trouvés à partir des simulations au pas de temps mensuel, avec une erreur moyenne de 18.8 mm pour 2009 et 2010 (voir Tableau VI-5, colonne 0 % de dégâts). Les débits simulés présentent les mêmes défauts que les débits simulés au pas de temps mensuel (Figure VI-24).

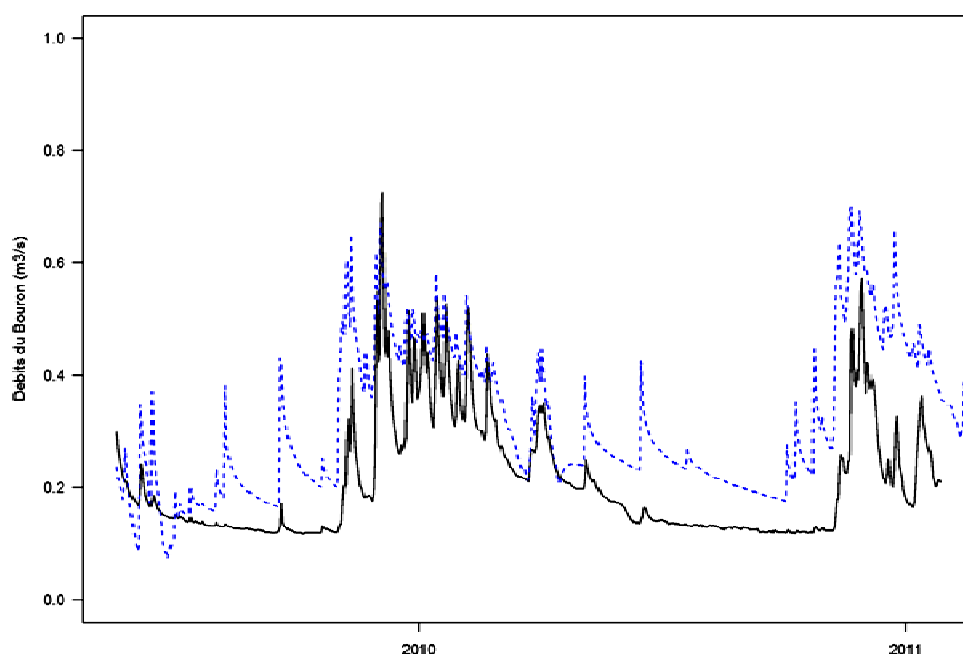


Figure VI-24 : Comparaison des débits simulés (bleus) et des débits observés (noir) à l'exutoire du Bouron au pas de temps journalier.

Une étude a été réalisée afin de voir si les différences de recharge calculées en modifiant la proportion des âges des peuplements influençaient les calculs de la charge hydraulique et les bilans hydrologiques annuels. Pour une proportion grandissante de jeunes peuplements (c'est-à-dire plus de dégâts), la recharge est plus importante pour les deux années (Tableau VI-5). La recharge appliquée semble cohérente avec les mesures réalisées sur les sites Bilos et du Bray. Kowalski et al. (2003) montrent en effet que la recharge potentielle sur une coupe rase, i.e. site de Bilos, serait de 517 mm.an^{-1} (Pluviométrie de 875 mm, évaporation de 358 mm), contre 264 mm.an^{-1} (Pluviométrie de 930 mm, évaporation de 666 mm) pour un peuplement de 28 ans, i.e. site du Bray. L'effet sur la piézométrie est semblable entre les deux années simulées : la charge hydraulique augmente avec le taux de dégât. Le système stocke

Tableau VI-5 : Différences observées dans les bilans hydriques annuels et la piézométrie en fonction du taux de dégâts sur les peuplements de plus de 5 ans.

		Bilan hydrique (mm/an)											
		0%_degâts	20%_degâts	30%_degâts	40%_degâts	50%_degâts	60%_degâts	70%_degâts	80%_degâts	90%_degâts	100%_degâts	Diff_max	
2010	Injection	-255.6	-333.2	-349.0	-364.9	-380.9	-396.8	-412.7	-428.7	-444.5	-474.4	218.8	
	Drainage	256.5	314.9	326.7	338.7	350.8	362.7	374.7	386.8	398.7	420.5	-164.0	
	Stockage	19.7	41.1	45.6	50.2	54.5	58.9	63.4	68.3	72.8	81.5	-61.8	
2011	Injection	-221.4	-288.5	-302.7	-316.7	-330.8	-345.0	-358.9	-373.2	-386.9	-412.9	191.5	
	Drainage	242.3	303.5	303.5	303.5	303.5	303.5	303.5	303.5	303.5	303.5	-61.2	
	Stockage	-3.7	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	-8.9	
		Charge hydraulique (m NGF)											
		0%_degâts	20%_degâts	30%_degâts	40%_degâts	50%_degâts	60%_degâts	70%_degâts	80%_degâts	90%_degâts	100%_degâts	Diff_max	
2010	Fraye	51.26	51.45	51.49	51.53	51.57	51.61	51.64	51.68	51.72	51.79	-0.53	
	Grand Cal	39.14	39.79	39.92	40.06	40.19	40.32	40.46	40.59	40.72	40.97	-1.83	
	Hillan C1	51.89	52.49	52.61	52.74	52.86	52.98	53.11	53.23	53.35	53.58	-1.69	
	Lembarras	55.24	55.59	55.66	55.73	55.80	55.87	55.95	56.02	56.09	56.22	-0.98	
	La Serre	54.88	55.13	55.18	55.23	55.28	55.33	55.38	55.43	55.48	55.58	-0.70	
	Les Pijoulets	62.83	63.16	63.23	63.29	63.36	63.43	63.50	63.56	63.63	63.75	-0.91	
	Retis	64.83	65.09	65.15	65.20	65.25	65.31	65.36	65.42	65.47	65.57	-0.74	
	Boutox	36.55	36.94	37.02	37.09	37.17	37.25	37.33	37.41	37.49	37.63	-1.08	
	Balège	71.77	72.19	72.28	72.37	72.46	72.54	72.63	72.72	72.80	72.97	-1.20	
	Fraye	51.20	51.39	51.43	51.46	51.50	51.54	51.58	51.62	51.66	51.73	-0.52	
2011	Grand Cal	39.21	40.09	40.28	40.46	40.65	40.84	41.02	41.21	41.39	41.73	-2.52	
	Hillan C1	52.10	53.06	53.25	53.45	53.65	53.85	54.05	54.25	54.45	54.81	-2.71	
	Lembarras	55.21	55.58	55.66	55.73	55.81	55.89	55.97	56.05	56.13	56.27	-1.06	
	La Serre	54.88	55.19	55.25	55.31	55.38	55.44	55.51	55.57	55.63	55.75	-0.87	
	Les Pijoulets	62.75	63.08	63.14	63.21	63.28	63.35	63.42	63.49	63.56	63.68	-0.93	
	Retis	64.80	65.10	65.16	65.23	65.29	65.35	65.41	65.48	65.54	65.65	-0.85	
	Boutox	36.57	37.04	37.14	37.24	37.33	37.43	37.53	37.63	37.73	37.91	-1.34	
	Balège	71.82	72.38	72.49	72.61	72.73	72.84	72.96	73.08	73.19	73.41	-1.59	

plus d'eau en 2010, ce qui est conforme aux observations. La recharge est presque doublée entre le témoin et le scénario le plus sévère (100% de dégâts). Un dégât de 20 % en surface augmente de 24 % les débits, tandis qu'un dégât de 100 % cause une augmentation de 44% des débits à l'exutoire.

6.7 Discussion et conclusion

Une phase importante du travail réalisé dans ce chapitre est la caractérisation du système aquifère du bassin versant du Bouron. Elle a permis de mieux connaître la géométrie et les conditions aux limites du système étudié. En particulier, une mise à jour de la côte du substratum établie en 1969 (Casenave, 1970) a été possible grâce aux informations recueillies sur les forages BSS contemporains. Cette étude a aussi permis de mieux appréhender la variabilité lithologique au sein de la zone d'étude, et de différencier les zones plus argileuses, à l'est, des zones plus graveleuses, à l'ouest. Des campagnes terrain ont permis de caractériser le réseau hydrologique de surface en période de crue et d'étiage (localisation, largeur, type permanent ou temporaire et altitude du talweg).

Ces informations étaient un préalable à la construction du modèle hydrologique, qui a constitué la seconde phase de travail. Dans l'ensemble, les simulations conduites ont permis de bien reconstituer le comportement moyen de l'aquifère. Le modèle hydrologique s'est révélé plus sensible au paramètre recharge qu'à n'importe quel autre paramètre. Au pas de temps mensuel, le modèle GRAECO s'est révélé être un bon outil pour quantifier la recharge, au moins comparable à une recharge issue d'un bilan de Thornthwaite, avec une RFU de 100 mm. L'analyse fine au pas de temps journalier a révélé l'importance de la prise en compte des prélèvements dans la nappe par la végétation pour simuler la recharge de l'aquifère.

De nombreuses améliorations restent à apporter au modèle hydrologique. La répartition des paramètres hydrauliques peut être améliorée par des passages plus progressifs entre zones. La condition de drain est une condition aux limites forte. La prise en compte du ruissellement aurait pu permettre d'améliorer les simulations, en se donnant plus de souplesse pour la définition de la côte des drains. De plus, si la proportion admise pour le bassin versant de la Leyre, i.e. 2/3 de drainage de la nappe pour 1/3 de ruissellement de surface (Manaud, 1997) est valable pour le sous-bassin versant du Bouron, il est probable que le ruissellement soit un phénomène secondaire, mais non négligeable. Vernier et al. (2003) constatent d'ailleurs que sur les sols sableux rencontrés dans les Landes de Gascogne, bien que le phénomène d'infiltration prédomine, un phénomène de ruissellement est visible sur une bande étroite le long des cours d'eau, en particulier si le sol est sec en surface (réhumidification difficile). Enfin, Habets (1998) montre que les pics de crue sont surestimés en prenant en compte le ruissellement, mais que le débit de base est sous-estimé si le souterrain n'est pas pris en compte. De récentes analyses de crues à haute fréquence tendent à montrer que le débit total est fortement influencé par les écoulements latéraux dans la zone insaturée (Canton M., EPOC, communication personnelle). Le choix de découpler les processus de ruissellement et le drainage de la nappe dans le cadre de cette étude, principalement axée sur l'effet de la recharge en surface, n'a pas permis de reconstituer des débits satisfaisants. Une étude hydrologique plus approfondie pourrait permettre de mieux comprendre la relation nappe/zone non saturée/rivière sur ce petit bassin versant. De plus, elle permettrait de tester

l'hypothèse selon laquelle l'augmentation des débits après une tempête est liée à une diminution de la reprise évapotranspiratoire par un rajeunissement des peuplements. En effet, les tests conduits dans ce travail n'ont pas été concluants. L'augmentation quasi-linéaire des débits avec l'augmentation de la part des coupes rases sur le bassin versant est peu probable. Andréassian (2004), dans sa synthèse des études conduites sur l'effet des modifications des couverts sur le débit, montre que pour une déforestation de 0 à 100% en surface des bassins versant, l'augmentation du débit est au maximum égale à 40%. La spatialisation de l'âge des peuplements permettrait de représenter les variations locales de recharge en lien avec la zone non saturée et les modifications des caractéristiques du sol concomitantes à son organisation sous un peuplement de plus en plus vieux, notamment la diminution de la conductivité hydraulique et de la vitesse d'infiltration (Vernier et al., 2003). Ces processus devront être représentés pour comprendre l'impact d'un événement extrême de type tempête sur un bassin versant.

La prise en compte d'un module gérant la zone non saturée reste la principale amélioration à apporter pour tous les piézomètres, et en particulier ceux où l'épaisseur de la zone non saturée est importante. L'utilisation du module NONSAT, basé sur un modèle à réservoir en cascade de Nash, aurait pu être envisagée. Cependant, la prise en compte de ce réservoir est gérée par le modèle GRAECO de manière moins empirique, par la distinction de la zone non saturée et de la zone saturée, en relation avec la zone de prélèvement racinaire. Cette partie du modèle GRAECO est cependant améliorable de façon à ajouter un décalage temporel entre pluviométrie et recharge, et une restitution plus progressive de cette dernière.

Des recommandations peuvent être faites pour la suite de l'étude, afin de coupler les modèles GRAECO et NEWSAM. Dans le temps imparti, l'application d'une recharge spatialisée n'a pas pu être testée. Les cartes des peuplements étant disponibles (chapitre III), cette étude pourra être entreprise rapidement dans la continuité de ce projet, afin de tester la robustesse du modèle hydrologique. Cependant, le modèle GRAECO devra au préalable être testé sur un plus grand nombre de peuplements de types variés, notamment sur un gradient de type de landes, de sèche à humide. Cela sous-entend la prise en compte de la variabilité spatiale des sols, du sous-bois mais aussi des pratiques sylvicoles. La partie « sol » du modèle GRAECO pourrait être améliorée en prenant en compte les profils racinaires, i.e., des densités de racines en fonction de la profondeur, afin de mieux simuler les prélèvements par les racines dans la zone saturée, et de reproduire l'effet progressif d'amortissement des prélèvements observés au chapitre V. En revanche, le réservoir « nappe » du modèle GRAECO pourrait être supprimé, et deviendrait un forçage par le modèle hydrogéologique NEWSAM. La prise en compte des prélèvements par la végétation et du tarissement de nappe par drainage latéral permettrait de mieux reproduire les étiages, et peut-être à terme de mieux quantifier l'utilisation de la ressource aquifère par la végétation. Une amélioration prochaine du modèle GRAECO consistera en l'intégration du fonctionnement des peuplements de moins de 7 ans pour lesquels le sous-bois occupe une place prépondérante, influençant fortement le

bilan hydrique. Le site de Bilos, qui est suivi depuis sa dernière coupe rase (1999) jusqu'à nos jours, permettra de mieux comprendre le fonctionnement de ces peuplements (Thèse de V. Moreaux, en cours). Par ailleurs, pour les sites de lande sèche, un effort de recherche doit être mené. Il semble en effet d'après les résultats du chapitre IV que la croissance des peuplements sur ces sites n'est pas influencée par la nappe. En revanche, la recharge de l'aquifère, i.e., la pluie efficace arrivant jusqu'à l'aquifère, est très dépendante de l'épaisseur de la zone non saturée et de la reprise évapotranspiratoire. La spatialisation de GRAECO devra prendre en compte les différents comportements des peuplements vis-à-vis de la nappe et les différents processus pour un calcul réaliste de la recharge de l'aquifère.

L'objectif de ce travail était de poser les fondations d'un modèle hydrogéologique permettant de comprendre et de simuler la dynamique de la nappe de manière spatialisée. Même s'il reste encore beaucoup de place pour des améliorations, les points clefs à améliorer ont été identifiés. A terme, le couplage des modèles NEWSAM et GRAECO devrait permettre de disposer d'un outil de compréhension, d'analyse et de prospection du fonctionnement des bilans hydriques et carbonés à l'échelle de petits bassins versants.

Chapitre VII

Conclusions et perspectives

*"La forêt, c'est encore un peu du Paradis perdu."
Marcel Aimé (Clérambard, 1984)*

Les changements environnementaux en cours, qu'ils soient continus et progressifs comme le changement climatique, l'accroissement de la teneur en CO₂ atmosphérique, ou abrupts comme les épisodes de tempête, mais aussi de canicule apparus au cours des deux dernières décennies, interrogent sur le devenir des forêts. Les écosystèmes forestiers sont sensibles à ces changements mais agissent aussi sur certains d'entre eux de façon majeure, e.g. le cycle du carbone global (Vitousek, 1991). Cette interrogation trouve un écho particulier en Aquitaine qui abrite la plus grande forêt artificielle d'Europe, et qui est en grande partie exploitée de façon intensive. La reconstitution de cette forêt détruite pour près de la moitié de sa biomasse par deux tempêtes hivernales successives (Colin et al., 2010) fait l'objet d'une incitation carbone de la part de la Région Aquitaine. Cette reconstitution mobilise aussi une prospective large auprès des acteurs impliqués sur les itinéraires techniques appropriés qu'il convient de mettre en place. Le rôle de la proximité de la nappe phréatique en hiver mais aussi de la saturation en eau du sol sur la stabilité des peuplements d'une part (Cucchi et al., 2003) et sa contribution à l'alimentation en eau des arbres en été d'autre part, montrent que la question des interactions nappe végétation est centrale dans cette perspective.

La compréhension du fonctionnement de ce massif forestier impose donc une approche intégrant, tout à la fois, la biogéochimie et la biophysique de l'écosystème et ses interactions avec le réseau hydrologique superficiel. Notre recherche visait précisément à apporter une contribution à la compréhension de cette interaction. Elle avait pour ambition initiale d'aller jusqu'au développement d'un outil de modélisation couplant le fonctionnement de la végétation et de la nappe plio-quaternaire qui soit à même d'analyser les facteurs qui ont conditionné le fonctionnement de bassins versants forestiers au cours des dernières décennies

Nous avons entrepris ce travail de recherche en développant d'abord une approche essentiellement expérimentale, avant d'engager une partie plus conceptuelle et de modélisation. Cette démarche se justifie par la méconnaissance profonde, surprenante, de l'hydrogéologie superficielle de notre objet d'étude. La survenue de l'évènement hautement imprévisible que fut la tempête Klaus de 2009, qui obligea à rééquiper entièrement un second dispositif d'étude afin d'acquérir les données nécessaires à l'intercomparaison de bassins-versants plus ou moins affectés (et donc représentatifs d'un fonctionnement normal ou perturbé), contribua à alourdir cette partie de notre travail de façon inopinée. Notre démarche s'explique aussi par la nécessité d'asseoir une approche de modélisation couplée végétation-hydrogéologie sur un corpus de données expérimentales suffisamment renseigné et détaillé qui permette de vérifier ou infirmer les hypothèses du modèle et de procéder aux analyses de sensibilité et d'erreur pertinentes.

Nous avons d'abord réalisé un travail considérable de prospection et d'enquête de données géologiques, hydrologiques et forestières, exhaustif pour certains types de données, auprès de tous les intervenants recherche, sylviculture, aménagement des eaux, parc régional, services de l'état en environnement, collectivités territoriales etc... Il nous a permis d'identifier deux bassins versants forestiers adaptés à notre étude. Nous avons ensuite

consacré une part importante de cette thèse à l'équipement de ces deux sites expérimentaux. Ils constitueront un site d'observation privilégié pour les études à venir, avec l'ensemble des données que nous avons rassemblées et collectées les couverts végétaux qui le compose, leurs couvertures pédologique et géologique, les séries temporelles de données climatiques, débits aux exutoires et piézométriques.

Pour ces deux bassins versants affluents de la rivière Leyre, le Bouron et le Tagon, nous avons combiné des inventaires forestiers, réalisés dans le cadre de ce travail ou antérieurs (données IFN) avec des données de télédétection, pour reconstruire l'historique sur 25 années de la couverture de végétation des deux bassins versants étudiés. Cette reconstitution, étape essentielle pour la suite de notre approche, a permis de reconstituer l'évolution des stocks de carbone dans la biomasse forestière et d'estimer une anomalie par rapport à un scénario de maintien du statu quo à l'échelle du bassin versant. Elle a aussi montré l'impact de la tempête de 1999 sur la distribution des classes d'âge qui explique sa répercussion sur l'hydrologie de surface des deux bassins considérés. Nous montrons que l'âge des peuplements de Pin maritime est le principal facteur discriminant la physionomie des peuplements et leur productivité. Cette reconstitution permet de dresser trois conclusions majeures :

- (1) la distribution des âges est affectée longtemps après le passage de la tempête, avec un rajeunissement important suite à l'exploitation des dégâts de tempête,
- (2) l'impact de la tempête sur le stock de carbone dans la biomasse est majeur, avec une diminution globale d'en moyenne 15 tC/ha,
- (3) la structure du paysage est modifiée, avec un paysage moins fragmenté mais aussi moins diversifié, ce qui, si les tempêtes devenaient plus fréquentes et leurs effets cumulatifs, pourrait avoir des conséquences sur la diversité des espèces, en particulier du sous-bois (Timbal, 1998).

Cette étude a aussi mis en relief l'effet des actions anthropiques sur le bilan de carbone, puisque sur le site expérimental du Bouron, l'effet de l'amélioration sylviculturale, qui a favorisé la séquestration du carbone, a surcompensé l'effet des pertes par exploitation des peuplements (environ 1tC/ha).

Nous avons caractérisé la dynamique du fonctionnement de la forêt et de la croissance des arbres en lien avec la nappe par une approche utilisant les méthodes de la dendro-écologie à l'échelle d'un paysage. Nous avons mis en œuvre cette approche afin d'analyser les effets de fluctuations du niveau de la nappe phréatique sur la croissance secondaire des arbres sur des séries temporelles de plusieurs décennies. L'analyse des chroniques piézométriques sur le long terme conduite en parallèle de l'analyse dendrochronologique, n'a pas révélé de modification du niveau de la nappe notable depuis les années 80, sauf pour un site particulier situé en pleine zone agricole. Par conséquent, cette conclusion ne vaut que pour les piézomètres situés sous peuplements forestiers, à distance des zones cultivées.

Bien que ne disposant pour cette analyse que d'un échantillon nécessairement restreint, la variabilité spatio temporelle des largeurs de cernes a révélé l'étroite relation entre la nappe plio-quaternaire, la croissance et la productivité primaire du Pin maritime. Cette étude montre de façon corrélative que l'aquifère est une ressource en eau clé pour la végétation lorsqu'elle est accessible aux racines. Inversement, l'effet négatif de la nappe en hiver, dans les stations où elle atteint la surface du sol (sites de lande humide) est aussi démontré et confirmé. Plus remarquable, la complète dissociation entre nappe et croissance des arbres en lande sèche démontre l'hypothèse traditionnellement admise selon laquelle cette ressource devient négligeable pour le Pin maritime lorsque la profondeur de la nappe phréatique dépasse la profondeur d'enracinement maximale observée pour cette espèce (environ 3 m ; Achat, 2008). La comparaison de la croissance entre les différentes gammes de profondeur de nappe montre que le fonctionnement en lande mésophile et en lande humide est similaire, avec une importance majeure des facteurs hydroclimatiques tels que précipitations et profondeur de nappe, confirmant les connaissances empiriques sur cette essence (Augusto, 2006). Lorsque la profondeur de la nappe demeure sous le seuil de 3 m, la croissance est toujours faible, peu sensible aux variations interannuelles du climat ou de l'hydrologie. Il est probable que d'autres facteurs limitants prévalent, tels que la fertilité du sol. La contrainte hydrique devient aussi moins variable d'une année à l'autre, sachant que le sol qui présente ici la plus faible capacité de rétention en eau, et qu'elle demeure limitante de façon quasi permanente. Nous recommandons de tenir compte de l'hydrologie de surface pour interpréter les fluctuations de croissance, de productivité et de séquestration du carbone par cette forêt et plus généralement par les systèmes forestiers sur nappe phréatique.

Dans ce volet de nos recherches, nous montrons aussi que le régime piézométrique qui différencie bien les types stationnels, ne se répercute que très partiellement sur la composition spécifique de la flore en sous bois, dans la lignée des observations faites par Bèsbes (1963). Celle-ci, contrairement aux pratiques en cours pour la gestion forestière, ne peut pas être considérée comme un indicateur hydrologique fiable pour distinguer lande humide et mésophile notamment. En effet, d'autres facteurs biotiques (aptitude compétitive, adaptation phénotypique) interviennent aussi dans la distribution des espèces considérées jusqu'alors comme indicatrices : Molinie, Fougère aigle, Hélianthème, Ericacées pour les principales d'entre elles.

Par une étude systématique des fluctuations de profondeur du toit de la nappe plio-quaternaire dans les deux bassins versants, nous avons démontré son lien fonctionnel avec le fonctionnement de la végétation et quantifié les échanges hydriques nappe-végétation à l'échelle des deux bassins versants. Les oscillations journalières du signal piézométrique dont la cinétique est cohérente avec un prélèvement par la végétation ont permis de quantifier l'amplitude des prélèvements dans la nappe. Cette estimation a mis en œuvre une analyse spectrale des séries temporelles profondeur de nappe qui devra encore être améliorée mais se révèle particulièrement prometteuse. Combinant ces mesures avec un bilan de masse moyen

de chaque bassin et comparant nos résultats avec les données disponibles sur l'évapotranspiration de peuplements de Pin à différents âges, nous avons pu quantifier les échanges entre atmosphère, zone vadose et nappe et estimé que celle-ci participe directement au flux prélevé pour l'évapotranspiration de la couverture végétale. Nous soulignons que ce prélèvement par la végétation est un processus déterminant dans un système aquifère tel que celui du bassin versant de la rivière Leyre et des Landes de Gascogne en général : la décharge de l'aquifère est une combinaison de la reprise évapotranspiratoire et du drainage souterrain.

L'effet différé ou immédiat des interventions anthropiques et des événements climatiques extrêmes sur le bilan d'eau et de carbone a aussi été exploré au cours de ce travail de thèse. Une étude complète a été réalisée sur le bassin versant du Bouron, afin de comprendre la variabilité lithologique et la géométrie de l'aquifère. Elle a servi de base pour la modélisation hydrogéologique du bassin versant. Les premiers tests sont concluants, avec une bonne représentation de la dynamique moyenne, au pas de temps mensuel en particulier des fluctuations de la profondeur de la nappe phréatique et les séries temporelles décennales de débits enregistrés aux exutoires. Afin d'améliorer la représentation de l'aquifère, nous avons montré qu'il sera à l'avenir important de ne pas négliger le ruissellement. En effet, la modélisation de l'aquifère seul, ne permet pas de rendre compte des débits de façon satisfaisante, car le modèle surestime la part l'eau drainée vers la nappe. La prise en compte trop simplifiée du module de zone non saturée s'est aussi révélée limitante, en particulier dans les zones où son épaisseur a plus de 3 m. Cependant, la modélisation hydrogéologique a permis de montrer la grande sensibilité du modèle à la recharge, dans un aquifère libre de faible puissance telle que la nappe plio-quadernaire des Landes de Gascogne. Il détermine la bonne représentation des débits et de la piézométrie, mais sa surestimation conduit à des charges hydrauliques pouvant dépasser la topographie.

Nous confirmons qu'un tel modèle, une fois calibré, est un outil efficace pour hiérarchiser les processus qui conditionnent la dynamique de l'aquifère, identifier les manques, et tester des scénarios. Les tests préliminaires conduits ici pour simuler l'effet d'une tempête sur le bilan en eau du bassin versant sont à prendre en compte avec prudence. Les améliorations à venir et le couplage des modèles permettront une meilleure représentation du système, notamment par l'inclusion des processus de ruissellement, la prise en compte d'une zone non saturée, et la spatialisation de la recharge sur le bassin versant.

Au terme des recherches présentées ici, il demeure cependant prématuré d'utiliser les modèles actuels pour analyser et décomposer avec précision les effets respectifs des différents facteurs affectant le fonctionnement de l'écosystème forestier des Landes de Gascogne. Si nous avons pu effectivement mettre en évidence des effets de premier ordre ou d'événements extrêmes, nous considérons qu'une amélioration des modèles d'une part et des données nécessaires d'autre part sera indispensable pour distinguer des effets plus discrets comme e.g. celui d'un réchauffement climatique ou d'une augmentation de CO₂ sur ce type de système.

Pour détaillée qu'elle soit, la seule cartographie des couverts comme celle réalisée au cours de cette étude ne suffit pas à caractériser la variabilité existant à l'échelle du paysage. La distribution spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol et du réseau hydraulique de surface, la mesure à fine échelle de la topographie, la variabilité spatiale des pluies et du microclimat à fine échelle (effets de lisière) apparaissent aussi comme des éléments à considérer. Le comportement du sous-bois pourrait également être un facteur de variabilité déterminant à l'échelle du paysage mais il est insuffisamment caractérisé à l'heure actuelle, même si des études récentes par télédétection ouvrent la voie à une caractérisation de la dynamique phénologique des différents types de lande à l'échelle du massif landais dans son ensemble (Thèse de Yauschew-Raguenes, en cours). De même, la sylviculture peut compliquer la spatialisation des peuplements. Cependant, cette variabilité est très complexe à étudier à l'échelle d'une région (Vernier et al., 2003).

Ces considérations pourraient inciter à centrer les suites éventuelles de notre recherche couplant hydrologie de surface et végétation sur des sous unités hydrographiques d'une surface un à deux ordres de grandeur plus restreintes (1km²) et qui pourraient être mieux documentées. Le couplage d'un modèle de végétation et d'un modèle hydrogéologique nous paraît être un point crucial pour mieux comprendre la durabilité des écosystèmes face aux changements climatiques, pour tester de nouveaux scénarios, comme par exemple l'effet de l'implantation de nouvelles espèces comme l'Eucalyptus (Moreaux et al., 2011b), ou pour aider les gestionnaires dans leur choix, comme par exemple, équilibre des surfaces agricoles et forestières pour le maintien d'un bon fonctionnement hydrologique ou bien encore conservation des débits d'étiage. Les applications d'un tel modèle couplé sont larges et ce champ de recherche nous semble prioritaire dans les années à venir.

Bibliographie

-- A --

- Achat, D.L., Bakker, M.R., Trichet, P., 2008. Rooting patterns and fine root biomass of *Pinus pinaster* assessed by trench wall and core methods. JOURNAL OF FOREST RESEARCH, 13:165:175.
- Aigrot, M., 1992. Résultats d'observation piézographiques sur la nappe aquifère superficielle des sables des Landes de Gascogne, Bassin versant de la Leyre. Actes du Colloque "La Leyre et son bassin versant", Pissos, 22-23 avril 1992, p.117-130.
- Alibert, L., 1977. Dictionnaire occitan-français, nouvelle édition. Institut d'études occitanes, Toulouse, 699p.
- Alvinerie, J., Gayet, J., 1973. Carte géologique France (1/50000), feuille Hostens (851). Orléans : BRGM. Notice explicative par Alvinerie J., Gayet J., Kieken M., Legigan P., Duvergé J., Pratviel L., 21p.
- Ambroise, B., 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, Facteurs, Modèles. *H*G*A* Editions, Bucarest, 200p.
- Andre, J. C., J. P. Goutorbe, A. Perrier, F. Becker, P. Bessemoulin, P. Bougeault, Y. Brunet, W. Brutsaert, T. Carlson, R. Cuenca, J. Gash, J. Gelpe, P. Hildebrand, J. P. Lagouarde, C. Lloyd, L. Mahrt, P. Mascart, C. Mazaudier, J. Noilhan, C. Ottle, M. Payen, T. Phulpin, R. Stull, J. Shuttleworth, T. Schmugge, O. Taconet, C. Tarrieu, R. M. Thepenier, C. Valencogne, D. Vidalmadjar and A. Weill, 1988. Evaporation over Land-Surfaces - 1st Results from Hapex-Mobilhy Special Observing Period. ANNALES GEOPHYSICAE6ATMOSPHERES HYDROSPHERES AND SPACE SCIENCES, 6(5): 477-492.
- Andréassian, V., 2004. Waters and forests : from historical controversy to scientific debate. JOURNAL OF HYDROLOGY, 291:1-27.
- Arrouays, D., Balesdent, J., Mariotti, A., Girardin, C., 1995. Modelling organic carbon turnover in cleared temperate forest soils converted to maize cropping by using ¹³C natural abundance measurements. PLANT AND SOIL, 173:191-196.
- Astié, H., 1964. Etude hydrogéologique de la nappe du Miocène dans le sud-ouest du bassin d'Aquitaine. Thèse de l'Université de Bordeaux I, 138 pages + cartes.
- Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, U. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. S. Kowalski, P. H. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grunwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini and T. Vesala, 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. ADVANCES IN ECOLOGICAL RESEARCH, 30: 113-175.
- Augusto, L., Badeau, V., Arrouays, D., Trichet, P., Flot, J.L., Jolivet, C., Merzeau, D., 2006. Caractérisation physico-chimique des sols à l'échelle d'une région naturelle à partir d'une compilation de données - Exemple des sols du massif forestier landais. ETUDE ET GESTION DES SOLS, 13(1):7-22.
- Augusto, L., Bakker, M.R., Morel, C., Meredieu, C., Trichet, P., Badeau, V., Arrouays, D., Plassard, C., Achat, D.L., Gallet-Budynek, A., Merzeau, D., Canteloup, D., Najar, M., Ranger, J., 2010. Is 'grey literature' a reliable source of data to characterize soils at the scale of a region? A case study in a maritime pine forest in southwestern France. EUROPEAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE, 61:807-822.
- Aussenac, G., 1970. Aperçu du rôle de la forêt sur l'économie de l'eau. REVUE FORESTIERE FRANCAISE, 22(6):603-618.

-- B --

- Badoux, A., Jeisy, M., Kienholz, H., Lüscher, P., Weingartner, R., Witzig, J., Hegg, C., 2006. Influence of storm damage on the runoff generation in two sub-catchments of the Sperbelgraben, Swiss Emmental. EUROPEAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH, 125:27-41.
- Banta, E.R., 2000. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - Documentation of packages for simulating evapotranspiration with a segmented function (ETS1) and drains with return flow (DRT1). U.S. Geological Survey Open-File Report 00-466, 127 p.
- Bakker, M.R., Augusto, L., Achat, D.L., 2006. Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites. PLANT SOIL, 286:37-51.
- Bakker, M.R., Jolicœur, E., Trichet, P., Augusto, L., Plassard, C., Guinberteau, J., Loustau, D., 2009. Adaptation of the fine roots to annual fertilization and irrigation in a 13-year-old *Pinus pinaster* stand. TREE PHYSIOLOGY, 29(2):229-238.

Bens, O., Wahl, N.A., Fischer, H., Hüttl, R., 2007. Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols : impacts of forest transformation on soil hydrological properties. EUROPEAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH, 126:101-109.

Berbigier, P., Diawara, A., Loustau, D., 1991. Etude microclimatique de l'effet de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois. ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES, 22: 157-177.

Berbigier, P., Bonnefond, J. M., Mellmann, P., 2001. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. AGRICULTURAL FOREST METEOROLOGY, 108:183–197.

Bert D., 1993. Impact of ecological factors, climatic stresses and pollution on growth and health of silver fir (*Abies alba* Mill.) in the Jura mountains: an ecological and dendrochronological study. ACTA OECOLOGICA, 14(2):229-246.

Bert, 2006. Croissance secondaire de la tige et Croissance des aiguilles de Pin maritime *Pinus pinaster*. Synthèse bibliographique 2006, disponible en ligne : http://dendrochrono.free.fr/Site_Didier/019_Dendroecologie_Pin_maritime_files/Bert_Synthese_2006.pdf (dernier accès le 16/07/2011)

Bert, D., Danjon, F., 2006. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT, 222:279-295.

Besbès, H., 1963. Etude hydrogéologique : la nappe phréatique du bassin de l'Eyre entre Beliet, Saint-Magne et Argelouse, Gironde et Landes. Thèse de l'Université de Bordeaux I, 99 pages + 37 pages d'annexes + 9 cartes.

Beuffe, H., Vernier, F., Chossat, J.C., 2002. Rapport final du projet Fonctionnement et Gestion raisonnée de l'écosystème forestier landais (Rapport 5, projet Landes 2). Convention de recherche ECOFOR N°97, GIP ECOFOR, p.67-79.

Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 65(1):2-16

Blyth, E.M., Dolman, A.J., Noilhan, J., 1994. The effect of forest on mesoscale rainfall : an example from HAPEIX-MOBILHY. JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY, 33:445-454.

Bojino, S.M, Bravo, F., 2008. Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 65(506):1-13.

Bond, B.J., Jones, J.A., Moore, G., Phillips, N., Post, D., McDonnell, J.J., 2002. The zone of vegetation influence on baseflow revealed by diel pattern of streamflow and vegetation water use in a headwater basin. HYDROGEOLOGICAL PROCESSES, 16:1671-1677.

Boninsegna, J.A., Argollo, J., Aravena, J.C., Barichivich, J., Christie, D., Ferrero, M.E., Lara, A., Le Quesne, C., Luckman, B.H., Masioka, M., Morales, M., Oliviera, J.M., Roig, F., Srur, A. Villalba, R., 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America : A review. PALAEOGEOGRAPHY, PALEOCLIMATOLOGY, PALEOECOLOGY, 281:210-228.

Bosch, J.M., Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. JOURNAL OF HYDROLOGY, 55:3-23.

Boukerma, B., 1987. Modélisation des écoulements superficiels et souterrains dans le sud-ouest de la France : Approche du bilan hydrique. Thèse de l'Ecole des Mines de Paris, 270p.

Bousek, R., 1933. Das tägliche periodische Steigen und Fallen des Grundwasserspiegels. DIE WASSERWIRTSCHAFT, 31:427-429.

Boutet, J.Y., Petit, P., 1981. Première approche des oiseaux des Landes de Gascogne. Actes du colloque de Sabres, 27-29 novembre 1981, La Grande Landes, histoire naturelle et géographie historique, p. 483-495.

Boyrie, S., 1972. Etude géologique et hydrogéologique de la région d'Hostens (Gironde) dans le cadre d'un aménagement touristique. Thèse de l'Université de Bordeaux I, 126 p. + 17 p. d'annexes + cartes.

Brejon de Lavergnée, G., 1988. Optimisation d'un réseau de mesures du bilan hydrique du sol à l'aide de la théorie des variables régionalisées dans une parcelle de Pin maritime (*Pinus pinaster*) (Cestas-Gironde). Rapport de Master, 3ème année ENGREF, Nancy, France, 35p.

Briffa, K.R., Osborn, T.J., Schweingruber, F.H., Harris, I.C., Jones, P.D., Shiyatov, S.G., Vaganov, E.A., 2001. Low-frequency temperature variations from a northern tree-ring density network. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 106:2929-2941.

Brookhouse, M., Lindesay, J., Brack, C., 2008. The Potential of Tree-Rings in *Eucalyptus paucifloras* for Climatological and Hydrological Reconstitution. GEOGRAPHICAL RESEARCH, 46(4):421-434.

Buddenbaum, H., Schlerf, M., Hill, J., 2005. Classification of coniferous tree species and age classes using hyperspectral data and geostatistical methods. INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 26(24):5453-5465.

Burel, F., Baudry, J., 1999. Ecologie du paysage, Concepts, méthodes et applications. Editions Tec&Doc, Paris, 359p.

Butler Jr., J.J., Kluitenberg, G.J., Whittemore, D.O., Loheide II., S.P., Jin, W., Billinger, M.A., Zhan, X., 2007. A field investigation of preatophyte-induced fluctuations in the water table. WATER RESOURCES RESEARCH, 43, 12p.

-- C --

C.A.G, 1988. Les landes et l'homme. Evolution naturelle et évolution dirigée des Landes de Gascogne. Centre d'animation du GRAOIX, Coupeau ED., Bordeaux, 144p.

Calder, I.R., 1999. The blue revolution. Earthscan Publication Ltd. Ed., Londres, 192p.

Campagne, F., 1997. Caractérisation de la conductivité hydraulique de surface et sa répartition sur le bassin versant du Tagon. Rapport de Master, Université de Bordeaux II, 69p. + 55p. d'annexes.

Camara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M., Garrido, J., 1996. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. COMPUTERS & GRAPHICS, 20(3):395-403.

Capdeville, J.P., Bouchet, J.M., 1992. Carte géologique France (1/50000), feuille Audenge (828). Orléans : BRGM. Notice explicative par Capdeville J.P., 32p.

CARBOEUROPE-IP, 2004. Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance, Integrated Project Strategic Plan 2004 - 2008. CarboEurope-IP Scientific Office (Ed.), Jena, Germany, 28p.

Casenave, 1970. Contribution à l'étude de l'aliros. Thèse de l'Université de Bordeaux I, 215 p.

Cassou, O., 1992. Pratique de l'agriculture moderne dans les Landes de Gascogne et environnement. Actes du Colloque "La Leyre et son bassin versant", Pissos, 22-23 avril 1992, p.131-136.

Castany, G., 1964. Courbes de tarissement et calcul des réserves régulatrices. ASS. BERKELEY ASSOC. INT. HYDROL. SCIENT., 63:319-329.

Chaperon, H., Crémère, L., 1994. Manuel pratique de sylviculture du Pin maritime. AFOCEL, 145 p.

Chehata, N., Orny, C., Boukir, S., Guyon, G., 2011. Object-based forest change detection using high resolution satellite images. Proceedings of PIA11 conferences, Photogrammetric Image Analysis 2011, Joint conference of ISPRS working groups I/2, III/1, III/4 and III/5, Munich, Germany, 5-7 octobre 2011, 6p.

Chevallier, P., 1983. L'indice des précipitations antérieures évaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. CAHIERS ORSTOM, SER. HYDROL., 20(3-4):179-189.

Choisnel, E., Payen, D., Lamarque, P., 1987. Climatologie de la Zone du projet HAPEX - MOBILHY, Météorologie Nationale, Paris, France, 73 p.

Chossat, J.C., Laplana, R., 1995. Gestion de la nappe entre agriculteurs et sylviculteurs dans le contexte des Landes de Gascogne. GEOMETRE, 7:43-45.

Chossat, J.C., Campagne, F., 1998. Infiltration et ruissellement en sol sableux des landes de Gascogne. MILIEUX POREUX ET TRANSFERTS HYDRIQUES, BULLETIN DU GROUPE FRANCOPHONE HUMIDIMETRIE ET TRANSFERTS EN MILIEUX POREUX, 42:140-145.

Chubey M.S., Franklin S.E., Wulder M.A., 2006. Object-based analysis of Ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, 72(4):383-394.

Ciais, P., Loustau, D., Bosc, A., Ogée, J., Dufrêne, E., François, C., Davi, H., Viovy, N., Delage, F., Piao, S., 2010. How will the production of French forests respond to climate change ? An integrated analysis from site to country scale. In Loustau, D., (Ed.), FOREST CARBON CYCLE AND CLIMATE CHANGE, Editions Quæ, Versailles, 311p.

Colin, A., Meredieu, C., Labbé, T., Béluard T., 2010. Etude rétrospective et mise à jour de la ressource en pin maritime du massif des Landes de Gascogne après la tempête Klaus du 24 janvier 2009. Rapport final de la convention IFN / MAAP n° E18 /2010 du 21 juin 2010, 39p.

Congalton, R., 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 7:35-46.

Corbier, P., Karnay, G., 2010. Gestion des eaux souterraine en région Aquitaine – Reconnaissance des potentialités aquifères du Mio-Plio-Quaternaire des Landes de Gascogne et du Médoc en relation avec les SAGE – Module 7 – Année 1 – BRGM/RP-57813-FR, 187 pages, 36 figures, 6 annexes.

Cormier, V., 2006. Contribution méthodologique à la spatialisation d'un modèle fonctionnel de couvert forestier, basé sur l'exemple d'une simulation de scénario climatique sur le Bassin versant du Tagon. Rapport de Master, 3^{ème} année ENITAB, Bordeaux, 87p.

Cosandey, C., 1993. Forêts et écoulements : Rôle de la forêt sur la formation des crues et le bilan d'écoulement annuel, Impact d'une coupe forestière. Rapport sectoriel de fin de contrat CEE, CNRS Meudon, 82 p.

Cosandey, C., Robinson, M., 2007. Hydrologie continentale. Armand Colin Ed., Paris, 360 p.

CRPF, 2005. Schéma régional de Gestion Sylvicole d'Aquitaine, Annexes. CRPF Ed., 65p.

Cottinet, D., 1974. Contribution à l'étude des fluctuations de la nappe du massif forestier landais. *Thèse de l'Université de Bordeaux I*, 47p pages + 7 pages d'annexes + cartes (5).

CRPF, 2005. Schéma régional de Gestion Sylvicole d'Aquitaine, Annexes. CRPF Ed., 65p.

Cucchi, V., Bert, D., 2003. Wind-firmness in *Pinus pinaster* Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999 storm. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 60(3):209-226.

Cucchi, V., Meredieu, C., Stokes, A., de Coligny, F., Suarez, J., Gardiner, B.A., 2005. Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT Volume: 213 Issue: 1-3 Pages: 184-196

Cucchi, V., Meredieu, C., Stokes, A., Berthier, S., Bert, D., Najjar, M., Denis, A., Lastennet, R., 2007. Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions. TREES, 18:460-466.

Czikowsky, J.M., Fitzjarrald, D.R., 2004. Evidence of seasonal changes in evapotranspiration in Easter US hydrological records. JOURNAL OF HYDROMETEOROLOGY, 5:974:988.

-- D --

Danjon, F., Bert, D., Godin, C., Trichet, P., 1999. Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitizing and analyzed with AMAPmod. PLANT SOIL, 217:49-63.

Danjon F., Fourcaud T., Bert D., 2005. Root architecture and wind firmness of mature *Pinus pinaster* (Ait.). NEW PHYTOLOGIST, 168:387-400.

Danson, F.M., Curran, P.J., 1993. Factors affecting the remote sensed response of coniferous forest plantations. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 43:55-65.

D'Arrigo, R., Abram, N., Ummenhofer, C., Palmer, J., Mudelsee, M., 2011. Reconstructed streamflow for Citarum River, Java, Indonesia : linkages to tropical climate dynamics. CLIMATE DYNAMICS, 36:451-462.

Davi, H., François, C., Ogée, J., Dufrêne, E., Ciais, P., Bosc, A., Loustau, D., Le Maire, G., 2010. Modelling tools for predicting the carbon cycle. In Loustau, D., (Ed.), FOREST CARBON CYCLE AND CLIMATE CHANGE, Editions Quæ, Versailles, 311p.

David, R., 1974. la fixation des dunes de la région d'Aquitaine : rôle du pin maritime, influence de l'eau sur la croissance du pin. INTERNATIONAL JOURNAL OF BIOMETEOROLOGY, 18(2):128-132.

Delzon, S., 2000. Photosynthèse de la Molinie (*Molinia coerulea* L. Moench) en sous-bois de Pin maritime, aux niveaux de la feuille et du couvert. Rapport de Master, Diplôme d'Etudes Approfondies d'Ecologie, Université d'Orsay-Paris XI, 35p.

Delzon, S., Loustau, D., 2005. Age-related decline in stand water use: sap flow and transpiration in a pine forest chronosequence. AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY, 129(3-4):105-119.

Demounem, R., Dayani, A., David, R., 1970. Influence exercée par les facteurs climatiques et édaphiques sur l'activité du cambium et la différenciation des éléments du bois, chez le pin maritime des Landes de Gascogne. *COMPTE RENDUS DE L'ACADEMIE DES SCIENCES DE PARIS*, 271(D):314-319.

Denis, A., 1962. Etude Hydrogéologique : La nappe phréatique du Bassin de l'Eyre (la basse vallée). Thèse de l'Université de Bordeaux I, 45 pages + 31 pages d'annexes + cartes (9).

Desclée, B., Bogaert, P., Defourny, P., 2006. Forest change detection by statistical object-based method. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 102:1-11.

Deshayes, M., Guyon, G., Jeanjean, H., Stach, N., Jolly, A., Hagolle, O., 2006. The contribution of remote-sensing to the assessment of drought effects in forest ecosystems. *ANNALS OF FOREST SCIENCE*, 63:579-595.

Desprez-Loustau, M. L., F. Dupuis, 1994. Variation in the phenology of shoot elongation between geographic provenances of maritime pine (*Pinus pinaster*)-implications for the synchrony with the phenology of the twisting rust fungus, *Melampsora pinitorqua*. *ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES*, 51: 553-568.

Devaux, M., 2010. Variations temporelles de la composition isotopique en carbone des sucres phloémiens, de la respiration et de la cellulose du xylème du tronc en relation avec le fonctionnement de l'arbre. Thèse de l'Université de Bordeaux I, 214p.

D.F.C.I., 1998. Etude du bassin versant du Canteloup. Union Landaise de D.F.C.I. (Ed.), 75p.

Diawara, A., Loustau, D., Berbigier, P., 1991. Comparison of two methods for estimating the evaporation of a *Pinus pinaster* (Ait.) stand : sap flow and energy balance with sensible heat flux measurements by an eddy covariance method. *AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY*, 54: 49-66.

Dolan, T.J., Hermann, A.J., Bayley, S.E., Zoltek, J., 1984. Evapotranspiration of a Florida, USA, fresh-water wetland. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 74(3-4):355-371.

Dorren L.K.A., Maier B., Seijmonsbergen A.C., 2003. Improved Landsat-based forest mapping in steep mountainous terrain using object-based classification. *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT*, 183(1-3): 31-46.

Dulaurent, A.M., Porte, A. J., Van Halder, I., Vetillard, F., Menassieu, P., Jactel, H., 2011. A case of habitat complementation in forest pests: Pine processionary moth pupae survive better in open areas. *FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT*, 261(6):1069-1076.

Dulong, J., Delarche, A., Lilin, C., 1990. Impact du défrichement sur l'environnement dans le massif forestier des Landes de Gascogne. Secrétariat d'état à l'environnement et Ministère de l'agriculture et de la forêt (Ed.), 105p.

Dupuy, L., Fourcaud, T., Stokes, A., Danjon, F., 2005. A density-based approach for the modeling of root architecture : application to Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) root systems. *JOURNAL OF THEORETICAL BIOLOGY*, 236:323-334.

Duzan, A., 2001. Etude statistique, géostatistique et modélisation d'un bassin versant à forte perméabilité. Bassin versant du Tagon. Rapport de Master, 3ème année ENS Géologie, Nancy, 114p.

DREAL Rhône-Alpes, 2009. Guide de l'utilisateur, Barème, Version 6.0. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (Ed.), 84p.

-- E --

Eaton, J.W., 2002. GNU Octave Manual. Network Theory Limited, disponible en ligne : <http://www.gnu.org/software/octave/>

Eilmann, B., Weber, P., Rigling, A., Eckstein, D., 2006. Growth reactions of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland. *DENDROCHRONOLOGIA*, 23:121-132.

El hadj Moussa, F., 1989. Circulation de l'eau dans un écosystème de pin maritime en Landes de Gascogne. Thèse de l'Université de Pau et des pays de l'Adour, 127p.

Engel, V., Jobbágy, E.G., Stieglitz, M., Williams, M., Jackson, R.B., 2005. The hydrological consequences of Eucalyptus afforestation in the Argentine Pampas. *WATER RESSOURCES RESEARCH*, 41:14p.

Enjalbert, H., 1960. Les pays Aquitains, Tome 1 : le modelé des sols. Biere Ed., Bordeaux, 607p.

-- F --

Fernández de Uña, L., 2009a. Effects of water table variations on maritime pine growth in the Landes region (France). Rapport de Master, Master of Forest Conservation, Faculty of Forestry, Toronto, 39p.

Fernández de Uña, L., 2009b. Notice technique Windendro. Document interne (base Qualité) N°P-00545-0.

Fischer, J.B., Whittaker, R.J., Malhi, Y., 2011. ET come home : potential evapotranspiration in geographical ecology. GLOBAL ECOLOGY AND BIOGEOGRAPHY, 20:1-18.

Ford, C.R., Brooks, J.R., 2003. Hydrological and climatic responses of *Pinus elliottii* var. *densa* in mesic pine flatwoods Florida, USA. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 60:385-392.

Fraser, D.A., 1962. Tree growth in relation to soil moisture. In Kozlowski, T.T., (Ed.), TREE GROWTH, The Ronald Press Co., New York, 442p.

Fritts, H.C., Mosimann, J.E., Bortorff, C.P., 1969. A revised computer program for standardizing tree-ring series. TREE-RING BULLETIN, 29(1-2):15-20.

Fritts, H.C., 1971. Dendroclimatology and Dendroecology. QUATERNARY RESEARCH, 1:419-449.

Fritts, H.C., 1976. Tree Rings and Climate. Academic Press, New-York, 567p.

Fritsch, J.M., 1990. Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie des petits bassins versants. Thèse de l'Université des Science et Techniques du Languedoc, Montpellier, 392 p.

-- G --

Gash, J. H. C., Shuttleworth, W. J., Lloyd, C. R., Andre, J. C., Goutorbe, J. P., Gelpe, J., 1989. Micrometeorological Measurements in Les-Landes Forest During Hapex-Mobilhy. AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY, 46(1-2): 131-147.

Gatewood, J.S., Robinson, T.W., Colby, B.R., Hem, J.D., Halpenny, L.C., 1950. Use of water by bottom-land vegetation in Lower Safford Valley Arizona - US Geological Survey. WATER SUPPLY PAPER, 1103:203.

Gerla, P.J., 1992. The relationship of water-table changes to the capillary fringe, evapotranspiration, and precipitation in intermittent wetlands. WETLANDS, 12(2):91-98.

Gilli, E., Mangan, C., Mudry, J., 2008. Hydrogéologie : Objets, méthodes, applications, 2^{ème} édition. Dunod Ed., Paris, 339p.

Granier, A., V. Bobay, J. H. C. Gash, J. Gelpe, B. Saugier and W. J. Shuttleworth, 1990. Vapor Flux-Density and Transpiration Rate Comparisons in a Stand of Maritime Pine (*Pinus-Pinaster Ait*) in Les-Landes Forest. AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY, 51(3-4): 309-319.

Granier, A., Loustau, D., 1994. Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY, 71: 1/2, 61-81.

Gribovszki, Z., Kalicz, P., Kucsara, M., 2006. Streamflow characteristics of two forested catchments in Sopron Hills. ACTA SILVATICA ET LIGNARIA HUNGARICA, 2:81-92.

Gribovszki, Z., Kalicz, P., Szilágyi, J., Kucsara, M., 2008. Riparian zone evapotranspiration estimation from diurnal groundwater level fluctuations. JOURNAL OF HYDROLOGY, 349:6-17.

Gribovski, Z., Szilágyi, J., Kalicz, P., 2010. Diurnal fluctuations in shallow groundwater levels and streamflow rates and their interpretation - A review. JOURNAL OF HYDROLOGY, 385:371:383.

Guehl, J.M., Picon, C., Aussenac, G., Gross, P., 1994. Interactive effects of elevated CO₂ and soil drought on growth and transpiration efficiency and its determinants in two European forest tree species. TREE PHYSIOLOGY, 14:707-724.

Guillot, M., Dayau, S., Bernier, F., Wigneron, J.P., Loustau, D., 2009a. Protocole Echantillonnage Bassin Versant du Bouron pour l'Unité expérimentale. Document interne (base Qualité) N°PX-00560-0.

Guillot, M., Fernández de Uña, L. Bert, D., Dayau, S., Loustau, D., 2009b. Protocole pour l'inventaire et de mesure de la croissance des Pins maritimes. Document interne (base Qualité) N°PX-00550-0.

Guillot, M., Dayau, S., 2010(a). Protocole de suivi de la nappe plio-quaternaire. Document interne (base Qualité) N°PX-00748-0.

Guillot, M., Dayau, S., 2010(b). Protocole de suivi des débits du Tagon. Document interne (base Qualité) N°PX-00747-0.

Guillot, M., Dayau, S., 2010(c). Protocole de caractérisation du réseau de drainage. Document interne (base Qualité) N°PX-00749-0.

Guillot, M., Dayau S., Spannraft K., Guyon D., Wigneron J.P., Loustau D., 2010. Impacts of two consecutive storms in carbon and water budgets in forested watersheds: study of two contrasted sites in Les Landes region. Poster, International Conference on Integrative Landscape Modelling LandMod 2010, 3-5 février 2010, Montpellier.

Guiot, J., 1991. The Bootstrapped Response Function. TREE-RING BULLETIN, 51:39-41.

Guyon, D., Riom, J., 1987. Intérêt du système SPOT pour l'étude de la Forêt Landaise. Colloque Spot I : utilisation des images, bilan, résultats, Paris Novembre 1987. Editions Cepadues, Paris, 961-970.

Guyon, D., Riom, J., 1996. Estimation de caractéristiques forestières à partir d'images à haute résolution spatiale (Spot 5). BULLETIN DE LA SPFT (société française de Photogrammétrie et Télédétection), 141(1):46-50.

Guyon, D., Courrier, G., Berbigier, P., 2001. Sensitivity analysis of coniferous forest reflectance with canopy structure and undergrowth characteristics from satellite data and modelling (Case study : Landes maritime Pine forest). Proceeding of the 8th International Symposium "Physical Measurement & Signatures in Remote-Sensing", 8-12 Janvier 2001, Aussois, France. CNES Ed. 387-392.

Guyon, D., Berbigier, P., Courrier, G., Lagouarde, J.P., Moreau, P., 2003. LAI estimation in managed maritime pine ecosystem from directions gap fraction measurements. CANADIAN JOURNAL OF REMOTE SENSING, 29(3): 336-348.

-- H --

Habets, F., 1998. Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Application aux bassins versants de l'Adour et du Rhône. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 224 p.

Harvey, A.H., 1995. Thermodynamic properties of water : Tabulation from the IAPWS Formulation 1995 for the thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific use. National Institute of Standard and technology (NIST), Boulder, USA, 3p.

Hay, G.J., Castilla, G., Wulder M.A., Ruiz, J.R., 2005. An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes. INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION, 7(4):339-359.

Hazéra, J., 2009. Compte-rendu du "Week-end Pro Silva" dans le Sud Ouest. Dernier accès en ligne le 25/08/2011. <http://www.pijouls.com/blog/wp-content/uploads/2009/12/Pro-Silva-dans-les-Landes-Compte-rendu.pdf>

Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. HYDROGEOLOGY JOURNAL, 10:91-109.

Heuperman, A., 1999. Hydraulic gradient reversal by trees in shallow water table areas and repercussion for the sustainability of tree-growing systems. AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT, 39(2-3):153-167.

Holmgren, P., Thuresson, T., 1998. Satellite Remote Sensing for Forestry Planning - A Review. SCANDINAVIAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH, 13:90-110.

Hornbeck, J.W., Martin, C.W., Eagar, C., 1997. Summary of water yield experiment at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. CANADIAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH, 27:2043-2052.

Hughes, M.K., 2002. Dendrochronology in climatology - the state of the art. DENDROCHRONOLOGIA, 20(1-2):95-119.

Huntington, T.G., Richardson, A.D., McGuire, K.J., Hayhoe, K., 2009. Climate and hydrological changes in the northeastern United States: recent trends and implications for forested and aquatic ecosystems. CANADIAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH, 39(2):199-212.

Hutton, J., 1788. Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe. TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY OF EDINBURGH, 1:209-304.

-- I --

IFN, 1998. Inventaire Forestier National : Département de la Gironde, commentaires sur les résultats. Ministère de L'agriculture et de la Pêche, 211p.

IFN, 2001. Projet "Suivi de la ressource pin maritime en Aquitaine", Financement Conseil régional Aquitaine, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche et de l'UE (FEOGA), Rapport final, Décembre 2001, 73p + Annexes. Document confidentiel.

IFN, 2008. Cartographie des coupes rases des peuplements de pin maritime en Aquitaine par détection satellitaire, Résultats sur la période 2002 – 2006. Convention CIBA – IFN n°2003-10-103, Rapport final, février 2008, 35p. Document confidentiel.

IFN, 2009. Pour bien comprendre les résultats publiés. Disponible en ligne : http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IFN_PubliNat2009_TOME-Methode.pdf (dernier accès le 11/07/2011) , La forêt française, Les résultats issus des campagnes d'inventaire 2005 à 2009, 32p.

IFN, 2010. Carte des dégâts de tempête de janvier 2009 sur le Massif landais. Quelques éléments méthodologiques. Disponible en ligne : <http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/methode.pdf> (dernier accès le 08/08/2011), Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 6p.

-- J --

Jackson, R.B. , Jobbágy, E.G., Avissar, R., Roy, S.B., Barrett, D.J., Cook, C.W., Farley, K.A., Le Maitre, D.C., McCarl, B.A., Murray, B.C., 2005. Trading Water for Carbon with Biological Carbon Sequestration. SCIENCE, 310:1944-1947.

Jacquet, J., 2010. La régénération naturelle des Pins. NOTRE FORET, 52:5.

Jensen, J.R., Qiu, F., Ji, M.H., 1999. Predictive modeling of coniferous forest age using statistical and artificial neural network approaches applied to remote sensor data. INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 20(14):2805-2822.

Johnson, C.D., 1987. Preferred water flow and localized recharge in a variable regolith. JOURNAL OF HYDROLOGY, 94:129-142.

Johnson, R.C., 1991. Effect of upland afforestation on water resources: the Balquhiddy experiment, 1981-1992. Report N°116. Institut of Hydrology, Wallingford.

Jolly, A. 1993. Estimation par télédétection satellitaire de la récolte annuelle en bois dans la futaie pure de pin maritime du massif des Landes de Gascogne. Thèse de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 314p. + 14 p. d'annexes.

Jolly, A., Guyon, D., Riom, J., 1993. Système d'information géographique, télédétection et politique forestière régionale. REVUE FORESTIERE FRANCAISE, XLV(numéro spécial):98-107.

Jolly, A., Guyon, D., Riom, J., 1996. Utilisation des données du moyen infrarouge de Landsat Thematic Mapper pour la mise en évidence des coupes rases sur le Massif Forestier landais. INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 17(18):3615-3645.

Jomaa, I., Audab, Y., Saleh, B.A., Hamzé, M., Safie, S., 2008. Landscape spatial dynamics over 38 years under natural and anthropogenic pressures in Mount Lebanon. LANDSCAPE AND URBAN PLANNING, 87:67-75.

Jones, H.H., 1992. Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology, 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, 427 p.

-- K --

Karnay, G., 1993. Carte géologique France (1/50000), feuille Saint-Symphorien (875). Orléans : BRGM. Notice explicative par Karnay G., 41p.

Kayitakire, F., Hamel, C., Defourny, P., 2006. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 102:390-401.

Kimes, D.S., Holben, B.N., Nickeson, J.E., McKee, W.A., 1996. Extracting forest age in a Pacific Northwest Forest from thematic mapper and topographic data. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 56(2):133-140.

Kirschbaum, M.U.F., Carter, J.O., Grace, P.R., Keating, B.A., Keenan, R.J., Landsberg, J.J., McKeon, G.M., Moore, A.D., Paul, K.I., Pepper, D.A., Probert, M.E., Richards, G.P., Sands, P.J., Skjemstad, J.O., 2001. Brief description of several models for simulating net ecosystem exchange in Australia. In NET ECOSYSTEM EXCHANGE WORKSHOP PROCEEDINGS, Kirschbaum M.U.F. and Rowena M. (Ed.), 18-20 avril 2001, Canberra, Australia, 8-29.

Klingebl, A., Legigan, P., 1981. Histoire Géologique de la Grande Lande. Actes du Colloque de Sabres, La Grande Lande: histoire naturelle et géographie historique, p13-31.

Klingebl, A., Billy, F., 1997. Les Lagunes du massif forestier des Landes de Gascogne. Actes du 4eme colloque ARBORA, "De la Gestion au Développement durable", 20-21 novembre 1997, pp. 57-67.

Kowalski, S., Sartore, M., Burlett, R., Berbigier, P., Loustau, D., 2003. The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest. GLOBAL CHANGE BIOLOGY, 9(7): 1051-1065.

Kuczera, G., 1987. Prediction of water yield reduction following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest. JOURNAL OF HYDROLOGY, 94:215-236.

-- L --

Lambert, R., 1996. Géographie du cycle de l'eau. Presses Universitaires du Mirail, Toulouse, 439p.

Landsberg, J., 2003a. Modeling forest ecosystems : state of the art, challenges and future directions. CANADIAN JOURNAL OF FOREST RESEACH, 33:385-397.

Landsberg, J., 2003b. Physiology in forest models : history and the future. FOREST BIOMETRY MODELLING AND INFORMATION SCIENCES, 1:49-63.

Lara, A., Urrutia, R., Villalba, R., Luckman, B.H., Soto, D., Aravena, J.C., Mc Phee, J., Wolodarsky, A., Pezoa, L., Léon, J., 2005. The potential use of tree-rings to reconstruct streamflow and estuarine salinity in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. DENDROCHRONOLOGIA, 22:155-161.

Larcher, W., 1983. Physiological Plant Ecology. Springer-Verlag (Ed), Berlin, 513p.

Lautz, L.K., 2008. Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in a semi-arid riparian zone. HYDROGEOLOGY JOURNAL, 16:483-497.

Ledoux, 1980. Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de l'ENSMP, Paris VI.

Ledoux, E., Girad, G., Villeneuve, J.P., 1984. proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin versant hydrologique. LA HOUILLE BLANCHE, 1-2:101-110.

Lee, C.H., 1912. An intensive study of the water ressources of a part of Owens Valley, California - US Geological Survey. WATER SUPPLY PAPER, 294:83-86.

Le Gars, C., 1992. Les transformation du paysage rural, l'irrigation et le drainage dans le bassin de la Leyre. Actes du Colloque "La Leyre et son bassin versant", Pissos, 22-23 avril 1992, p.117-130.

Le Huy, C., 1995. Etude de la distribution spatiale de la perméabilité dans les Landes de Gascogne. Rapport de Master, ENSEEIHT, Toulouse, Annexe1, 11p.

Le Maitre, D., Scott, D.F., Colin, C., 1999. A review of information on interaction between vegetation and groundwater. WATER SA, 25(2):137:152.

Le Moigne, P., 2002. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Note de centre N°77, Centre National de Recherches Météorologiques Météo-France, Toulouse, 30 pp.

Lemoine, B., 1969. Le Pin maritime dans les Landes de Gascogne. Etude des relations d'allométrie concernant le volume des peuplements, en liaison avec certaines caractéristiques de la station. ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES, 26(4):445:473.

Lemoine, B., Decourt, N., 1969. Tables de production pour le Pin maritime dans le sud-ouest de la France. RECHERCHE FORESTIERE FRANCAISE, 21(1):5:16.

Lemoine, B., 1981. Application de l'analyse factorielle à l'tude de la croissance en hauteur des arbres : exemple du Pin maritime. ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES, 38(1):31-54.

Lemoine, B., 1991. Growth and yield of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.): the average dominant tree of the stand. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 48:593-611.

Levassor, A., Ledoux, E., 1999. Notice d'utilisation de NEWSAM. Ecole des Mines de Paris (Ed.), 186p.

Liu, W., Song, C., Schroeder, T.A., Cohen, W.B., 2008. Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data. INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING, 29(13):3855-3872.

Loheide II, S.P., Butler Jr., J.J., Gorelick, S.M., 2005. Use of diurnal water table fluctuations to estimate groundwater consumption by phreatophytes: a saturated-unsaturated flow assessment. WATER RESSOURCES REASEARCH, 41, 14p.

Loheide II, S.P., 2008. A method for estimating subdaily evapotranspiration of shallow groundwater using diurnal water table fluctuations. ECOHYDROLOGY, 1:59-66.

Loustau, D., Granier, A., Moussa, F.E.H., 1990. Seasonal-variation of sap flow in a maritime pine stand. ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES, 47(6):599-618.

Loustau, L., Granier, A., El Hadj Moussa, F., 1990. Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de Pins maritimes. ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES, 21:599-618.

Loustau, D., Berbigier, P., Granier, A., Moussa, F.E.H., 1992. Interception loss, Throughfall and Stemflow in a maritime pine stand. 1. Variability of Throughfall stemflow beneath the pine canopy. JOURNAL OF HYDROLOGY, 138(3-4):449-467.

Loustau, D., P. Berbigier, P. Roumagnac, C. Arruda-Pacheco, J. S. David, M. I. Ferreira, J. S. Pereira and R. Tavares, 1996. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. 1. Seasonal course of water flux through maritime pine. OECOLOGIA, 107(1): 33-42.

Loustau, D., Domec, J. C., Bosc, A., 1998. Interpreting the variations in xylem sap flux density within the trunk of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.): application of a model for calculating water flows at tree and stand levels ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES, 55(1/2): 29-46.

Loustau, D., Bert, D., Trichet, T., 1999. Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise : implications pour une gestion durable. REVUE FORESTIERE FRANCAISE, 51(5):571-591.

Loustau, D., Pluviaud, F., Bosc, A., Porté, A., Berbigier, P., Déqué, M., Pérarnaud, V., 2001. Impact of a regional 2xCO₂ climate scenario on the water balance, carbon balance and primary production of maritime Pine in Southwestern France. In: Carnus J-M;Dewar, R, Loustau D, Tomé M (eds.) Models for the Sustainable Management of Plantation Forests. European Cultivated Forest Institute (EFI sub division) EFI Proceedings numéro 41D, Bordeaux, pp. 45-58.

Loustau, D., Bosc, A., Colin, A., Ogée, J., Davi, H., François, C., Dufrêne, E., Déqué, M., Cloppet, E., Arrouays, D., Le Bas, C., Saby, N., Pignard, G., Hamza, N., Granier, A., Bréda, N., Ciais, P., Viovy, N., Delage, N., 2005. Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. TREE PHISIOLOGY, 25:813-823.

Loustau, D., Guillot, M., 2009. Impact écologique de la tempête et conséquences sur les cycles de l'eau et du carbone. INNOVATIONS AGRONOMIQUES, 6:1-6.

Lucot, E., Bruckert, S., 1992. Organisation du système racinaire du chêne prédonculé (*Quercus robur*) développé en conditions édaphiques non contraignantes (sol brun lessivé colluvial). ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES, 49:465-479.

-- M --

Maison, P., 2004. Modelisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant du Tagon. Etude CEMAGREF N°90, CEMAGREF de Bordeaux, 85p.

Manaud, F., Bouchet, J.M., Deltreil, J.P., Maurer, D., Trut, G., Auby, I., Dreno, J.P., L'Yavanc, J., Masson, N., Pellier, C. , 1997. Etude intégrée du Bassin d'Arcachon. Tome 1 : Physique. Rapport Interne DEL/Arcachon, 1^{er} classeur, 5-15p.

Martinet, M.C., Vivoni, E.R., Cleverly, J.R., Thibault, J.R., Schuetz, J.F., Dahm, C.N., 2009. On groundwater fluctuations, evapotranspiration, and understory removal in riparian corridors. WATER RESOURCES RESEARCH, 45: W05425.

- Mauge, J.P., 1987. Le pin maritime, premier résineux de France. Edition CPFA-IDF, Paris, 191p.
- McCulloch, J.S.G., Robinson, M., 1993. History of forest hydrology. JOURNAL OF HYDROLOGY, 150:198-216.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S . Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, Chapter A 1, 586 p.
- Meayboom, P., 1967. Groundwater studies in the Assiniboine River drainage bassin - part II : hydrologic characteristics of phreatophytic vegetation in South-central Saskatchewan. BULLETIN - GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA, 139.
- Meredieu, C., Colin, A., Tessier du Cros, R., Chantal, M., Porté, A., Loustau, D., 2005. Évaluation des stocks de carbone dans la biomasse de peuplement de Pin maritime : application à l'échelle régionale. ARBORA (ed.), VIIIème Colloque ARBORA, Carbone, Forêt, Bois : impact du changement climatique, stratégies pour la filière ?, p143-159.
- Mérian, P., Lebourgeois, F., 2011. Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests : A multi-species analysis. FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT, 261:1382-1391.
- Mitchell, V.L., 1967. An investigation of certain aspects of tree growth rates in relation to climate in the Central Canadian boreal forest. DEPARTEMENT OF METEOROLOGY TECHNICAL REPORT, 33, University of Wisconsin-Madison, 62p.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. SYMP. SOC. EXP. BIOL. 19:205-224
- Moreaux, V., Lamaud, E., Bosc, A. Bonnefond, J.M., Medlyn, B., Loustau, D., 2011. Paired comparison of water, energy and carbon exchanges over two young maritime pine stand (*Pinus Pinaster* Ait.) : effects of thinning and weeding in the early stage of tree growth. TREE PHYSIOLOGY, 31:903-921.

-- N --

- Nadezhdina, N., Ferreira, M.I., Silva, R., Pacheco, C.A., 2008. Seasonal variation of water uptake of a *Quercus suber* tree in Central Portugal. PLANT SOIL, 305:105-119.
- Navrot, C., 2006. Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux - Leyre, cours d'eau côtiers et milieux associés. Un territoire, une ressource en eau, des usages. Accessible en ligne : http://www.gesteau.eaufrance.fr/sites/default/files/doc_SAGE05006-1155721009.pdf (dernier accès le 04/09/2011).
- Néfaoui, M., 1996. Dendroécologie, productivité et dynamique de la croissance radiale du Pin maritime naturel au Maroc. Thèse de l'Université de Marseille, 300p.
- Nilson, T., Peterson, U., 1994. Age Dependence of Forest Reflectance: Analysis of Main Driving Factors. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 48:319-331.
- Nunes de Lima, M.V. (Ed.), 2005. CORINE Land Cover updating for the year 2000: IMAGE2000 and CLC2000. Products and Methods. ISBN 92-894-9862-5, EUR 21757 EN, European Commission-Joint Research Centre, Ispra, Italy.

-- O --

- Ogée, J., Brunet, Y., Loustau, D., Berbigier, P., Delzon, S., 2003. MuSICA, a CO₂, water and energy multilayer, multileaf pine forest model: evaluation from hourly to yearly time scales and sensitivity analysis. GLOBAL CHANGE BIOLOGY, 9: 697-717.

-- P --

- Papy, L., 1981. Les Landes de Gascogne et de la Côte d'Argent. Collection pays du Sud-Ouest. Privat Ed., Toulouse, 178p.
- Patenaude, G., Milne, R., Dawson, T.P., 2005. Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: reporting to the Kyoto Protocol. ENVIRONMENTAL SCIENCE & POLICY, 8:161-178.

Pederson, N., Jacoby, G.C., D'Arrigo, R.D., Cook, E.R., Buckley, B.M., Dugarjav, C., Mididdorj, R., 2001. Hydrometeorological Reconstitutions for Northeastern Mongolia derived from Tree Rings : 1651-1995. JOURNAL OF CLIMATE, 14:872-881.

Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. PROC. ROY. SOC. LONDON A(194), S:120-145.

Platel, J.P., Dubreuilh, J., 1991. Carte géologique France (1/50000), feuille Parentis-en-Born (874). Orléans : BRGM. Notice explicative par Platel J.P., Dubreuilh J., 51p.

Platel, J.P., 1992. Carte géologique France (1/50000), feuille Belin (850). Orléans : BRGM. Notice explicative par Platel J.P., 66p.

Polacek, D., Kofler, W., Oberhuber, W., 2005. Radial growth of *Pinus sylvestris* growing on alluvial terraces is sensitive to water-level fluctuations. NEW PHYTOLOGIST, 169:299-308.

Polge, H., Illy, G., 1967. Observations sur l'anisotropie du Pin maritime des Landes. ANNALES DES SCIENCES FORESTIERES, 24(3):205-231.

Porté, A., 1999. Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Lande Humide. Thèse de l'Université de Paris-Sud, 197p.

Porté, A., Bosc, A., Champion, I. et Loustau, D., 2000. Estimating the foliage area of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) branches and crowns with application to modelling the foliage area distribution in the crown. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 57:73-86

Porte, A., Loustau, D., 2001. Seasonal and interannual variations in carbon isotope discrimination in a maritime pine (*Pinus pinaster*) stand assessed from the isotopic composition of cellulose in annual rings. TREE PHYSIOLOGY, 21:861-868

Porté, A., Trichet, P., Bert, D., Loustau, D., 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT, 158(1-3):71-83.

Porté, A.J., Samalens, J.C., Dulhoste, R., Teissier Du Cros, R., Bosc, A., Meredieu, C., 2009. Using cover measurements to estimate aboveground understorey biomass in Maritime pine stands. ANNALS OF FOREST SCIENCES, 66(307):1-11.

Powell, S.L., Cohen, W.B., Healey, S.P., Kennedy, R.E., Moisen, G.G., Pierce, K.B., Ohmann, J.L., 2010. Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data : A comparison of empirical modeling approaches. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 114:1053-1068.

Presley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. MONTHLY WEATHER REVIEW, 100:31-92.

-- Q --

Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY, 47:92-107.

-- R --

Rasmussen, T.C., Crawford, L.A., 1997. Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. GROUND WATER 35(3):502-511.

R Development Core Team, 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Richter, K., Eckstein, D., 1990. A proxy summer rainfall record for southwest Spain derived from living and historic pine trees. DENDROCHRONOLOGIA, 8:67-82.

Rivalland, V., Calvet, J.C., Berbigier, P., Brunet, Y., Granier, A., 2005. Transpiration and CO₂ fluxes of a pine forest: modelling the undergrowth effect. ANNALES GEOPHYSICAE, 23: 291-304.

Robertson, P.A., 1992. Factors affecting tree growth on three lowland sites in Southern Illinois. THE AMERICAN MIDLAND NATURALIST, 128:218-326.

Rolland, C., 1993. Tree-ring and climate relationships for *Abies alba* in the Internal Alps. TREE-RING BULLETIN, 53:1-11.

Rosenberry, D.O., Winter, T.C., 1997. Dynamics of water-table fluctuations in an upland between two prairie-pothole wetlands in North Dakota. JOURNAL OF HYDROLOGY, 191:266-289.

Roux, J.C., 2006. Aquifères et Eaux souterraines en France, BRGM Editions, Collection Scientifique et technique, 956p.

-- S --

Sachs, D.L., Sollins, P., Cohen, W.B., 1998. Detecting landscape changes in the interior of British Columbia from 1975 to 1992 using satellite imagery. CANADIAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH, 28(1):23-36.

SAGE, 1999. Nappes profondes en Gironde – Etat des lieux. Compilation et synthèse HYDRO-M Environnement disponible en ligne : <http://www.gesteau.eaufrance.fr/DOC/SAGE/SAGE05003-EtatLieux.pdf> (dernier accès le 05/08/2011).

SAGE, 2005. Leyre, cours d'eau côtiers et milieux associés. Phase d'élaboration : Le territoire en 2003, Etat des lieux des milieux et des usages. Parc Naturel des Landes de Gascogne (Ed.), 193p.

Sahoo, A.K., Pan, M., Troy, T.J., Vinukollu, R.K., Sheffield, J., Wood, E.F., 2011. Reconciling the global terrestrial water budget using satellite remote sensing. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 115:1895-1965.

Saint Marc, A., 1992. Etude des vitesses de circulation latérale de la nappe dans les sables des Landes de Gascogne. Rapport de Master, ESGT, Le Mans, p.19-26+Annexe 1, 9p.

Saint-Pé, M.A., 1966. Etude hydrogéologique et géochimique : la nappe phréatique au Nord-est du Bassin d'Arcachon et son influence sur l'alimentation des aquifères sous-jacents. Thèse de l'Université de Bordeaux I, 78 pages + 26 pages d'annexes + cartes.

SANDRE, 2011. Fiche rivière la Grande Leyre (S2--0250) . Dernier accès en ligne le 25/08/2011. http://services.sandre.eaufrance.fr/Courdo/Fiche/client/fiche_courdo.php?CdSandre=S2--0250

Sargos, R., 1949. Contribution à l'histoire du boisement des Landes de Gascogne. Delmas Ed., Beziers, 836p.

Schilling, K.E., Zhang, Y.K., Drobney, P., 2004. Water table fluctuations near an incised stream, Walnut Creek, Iowa. JOURNAL OF HYDROLOGY, 286:236-248.

Schilling, K.E., 2007. Water table fluctuations under three riparian land covers, Iowa (USA). HYDROGEOLOGICAL PROCESSES, 21:2415-2424.

Schweingruber, F.H., 1990. Tree rings and environment. DENDROECOLOGY, Haupt/Berne, Stuttgart, Vienna.

Seguin, J.J., Baudry, D., 2002. Cartographie de la vulnérabilité des systèmes aquifères de l'Aquitaine. BRGM/RP-52042-FR, 39 pages, 3 annexes.

Senitz, S., 2001. Untersuchung und Anwendung kurzperiodischer Schwankungen des Grundwasserspiegels in Thüringen. GRUNDWASSER, 4:163-173.

Shah, N., Nachabe, M., Ross, M., 2007. Extinction depth and evapotranspiration from ground water under selected land covers. GROUND WATER 45(3):329-338.

Shaiek, O., Loustau, D., Trichet, P., Meredieu, C., Bachtobji, B., Garchi, S., Hédi El Aouni, M., 2011. Generalized biomass equation for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 68(3):443-452.

Shannon, C., Weaver, W., 1949. The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana, 144p.

Sharma, M.L., Barron, R.J.W., Fernie, M.S., 1987. Areal distribution of infiltration parameters and some soil properties in lateritic catchments. JOURNAL OF HYDROLOGY, 94:109-127.

Simpson, E.H., 1949. Measurement of diversity. NATURE, 163:688-688.

Song, C., Schroeder, T.A., Cohen, W.B., 2007. Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery . REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 106(2):228-237.

Song, C.H., Woodcock, C.E., 2003. A regional forest ecosystem carbon budget model: impacts of forest age structure and landuse history. *ECOLOGICAL MODELLING*, 164(1):33-47.

Spannraft, K., 2009a. Fabrication d'une carte d'occupation du sol et de l'âge des peuplements de Pins maritimes en 200, à partir des images multitudes de SPOT et des cartes des coupes rases de l'IFN. Simulation de l'évolution temporelle des âges de pins pour de petits bassins versants dans le massif landais. Rapport technique du stage de fin d'études, Université de Munich, 115p.

Spannraft, K., 2010. Protocole de mesure au sol de variables de structure forestière sur un échantillon de peuplements de pin maritime du bassin versant du Bouron en vue de la création d'un jeu de données d'apprentissage pour la cartographie des classes d'âge à partir d'images SPOT. Document interne (base Qualité) N°PX-00745-0.

Spurr, S.H., Barnes, B.V., 1980. *Forest Ecology* (3rd Edition). John Wiley & Sons, New-York, 687p.

Stach, N., Deshayes, M., Le Toan, T., 2005. Mapping storm damage to forest using optical and radar remote-sensing - The case of the December 1999 storms in France. In Olsson H. (Ed.), *Proceedings of ForestSat 2005*, Borås, May 31-June 3 2005, SWEDISH NATIONAL BOARD OF FORESTRY, 8(a):89-93.

Stella, P., Lamaud, E., Brunet, Y., Bonnefond, J.M., Loustau, D., Irvine, M., 2009. Simultaneous measurements of CO(2) and water exchanges over three agroecosystems in South-West France. *BIOGEOSCIENCES*, 6(12):2957-2971.

Sulkava, M., Luyssaert, S., Zaehle, S., Papale, D., 2011. Assessing and improving the representativeness of monitoring networks: The European flux tower network example. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-BIOGEOSCIENCES*, 116:G00J04.

Sun, G., Riekerk, H., Kornhak, L.V., 2000. Ground-water-table rise after forest harvesting on cypress-pine flatwoods in Florida. *WETLANDS*, 20(1):101-112.

-- T --

Thioulouse, J., Dray, S., 2009. Package 'ade4TkGUI' : ade4 Tcl/Tk Graphical User Interface. R documentation, disponible en ligne : <http://127.0.0.1:11192/library/ade4TkGUI/html/ade4TkGUI.html> (dernier accès le 29/07/2011).

Thorntwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *THE AMERICAN GEOGRAPHICAL SOCIETY OF NEW YORK*, 38:55-94.

Timbal, J., Maizeret, C.H., Favennec, J., 1998. Biodiversité végétale et gestion durable de la forêt landaise de pin maritime : bilan et évolution. *REVUE FORESTIERE FRANCAISE*, 5:403-425.

Trichet, P., Jolivet, C., Arrouays, D., Loustau, D., Bert, D., Ranger, J., 1999. Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime. *ETUDE ET GESTION DES SOLS*, 6(4):197-214.

Trichet, P., Loustau, D., Lambrot, C., Linder, S., 2008. Manipulating nutrient and water availability in a maritime pine plantation : effect on growth, production, and biomass allocation at canopy closure. *ANNALS OF FOREST SCIENCE*, 65(814):1-12.

Trichet, P., Bakker, M.R., Augusto, L., Alazard, P., Merzeau, D., Saur, E., 2009. Fifty Years of Fertilization Experiments on *Pinus pinaster* in Southwest France: The Importance of Phosphorus as a Fertilizer. *FOREST SCIENCES*, 55:390-402.

Tschinkel, H.M., 1963. Short-term fluctuation in streamflow as related to evaporation and transpiration. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 68(24):6459-6469.

Turc, L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Formule climatique simplifiée et mise à jour. *ANNALES AGRONOMIQUES*, 12(1):13-49.

Turk, L.J., 1975. Diurnal fluctuation in streamflow as related to evaporation and transpiration. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 68(24):6459:6469.

-- V --

Vauchel, F., 1996. Effet d'une fertilisation phosphatée sur Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) : l'essai de fertilisation de Berganton (33). résultats à 32 ans : étude dendroécologique, bilan en P du sol et diagnostic foliaire. Rapport de DEA, Université de Nancy, 30p.

Venables, W.N., Ripley, B.D., 2002. Modern Applied Statistics with S, Fourth edition. Springer Ed., New-York, USA, 495p.

Vernier, F., Beuffe, H., Chossat, J.C., 2003. Forêt et ressource en eau : étude de deux bassins versants en sols sableux (Landes de Gascogne). REVUE FORESTIERE FRANCAISE, LV:523-542.

Vertessy, R.A., Watson, F.G.R., O'Sullivan, S.K., 2001. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT, 143:13-26;

Vidal, J.P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.M., 2010. A 50-years high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY, 30(11): 1627-1644.

Viera, J., Campelo, F., Nabais, C., 2009. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuation of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate. TREES, 23:257-265.

Vincke, C., Thiry, Y., 2008. Water-table is a relevant source for water uptake by Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand : Evidences from continuous evaporation and water table monitoring. AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY, 148:1419-1432.

Vitousek, P.M., 1991. Can planted forests counteract increasing atmospheric carbon-dioxide. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL QUALITY, 20:348-354.

Vittecoq, B., 2002. Etude hydrogéologique et modélisation des écoulements dans un bassin versant de type landais. Rapport de Master, Université de Bordeaux I, 54 p. + 64 p. d'annexes.

Vouvé, J., 1962. Etude Hydrogéologique : La nappe phréatique du Bassin de l'Eyre (rive droite de la Petite-Eyre, d'Argelouse à Cazalis). Thèse de l'Université de Bordeaux I, 135 pages + 27 pages d'annexes + 10 cartes.

-- W --

Wigneron, J.P., Guyon, D., Calvet, J.C., Courier, G., Bruguier, N., 1997. Monitoring coniferous forest characteristics using a multifrequency (5-90 GHz) microwave radiometer. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 60(3):299-310.

White, W.N., 1932. Method of estimating groundwater supplies based on discharge by plants and evaporation from soil - results of investigation in Escalante Valley, Utah - US Geological Survey; WATER SUPPLY PAPER, 659(A):1-105.

Woodhouse, C., Lukas, J.L., 2006. Multi-century tree-ring reconstitution of Colorado streamflow for water resource planning. CLIMATIC CHANGE, 78:293-315.

-- Z --

Zhu, J., Young, M., Healey, J., Josoni, R., Osterberg, J., 2011. Interference of river level changes on riparian zone evapotranspiration estimates from diurnal groundwater level fluctuations. JOURNAL OF HYDROLOGY, 403:381-398.

Table des tableaux

Tableau II-1 : Itinéraire technique du Pin maritime	34
Tableau II-2 : Faciès des séquences virtuelles majeures identifiées sur l'ensemble landais. ..	40
Tableau II-3 : Comptes-rendus de forages	54
Tableau III-1 : Mesures réalisées sur les placettes d'échantillonnage pour les deux bassins versants au cours des campagnes terrain.	84
Tableau III-2 : Surface des forêts de production du Massif Landais avec le Pin maritime comme essence principale selon la classe d'âge, campagnes d'inventaires de 2005 à 2008 de l'IFN.	85
Tableau III-3 : Bandes spectrales et paramètres utilisés pour la segmentation et la classification des différents types de couverts sur les bassins versants du Bouron et du Tagon.	89
Tableau III-4 : Age attribué en 2007 en fonction de la période de détection de la coupe indiquée dans la cartographie IFN des coupes rases	92
Tableau III-5 : Coefficient de la régression linéaire Biomasse aérienne (tonne/hectare)= log(Age)	99
Tableau III-6 : Matrices de confusion avant et après l'amélioration par la carte des coupes rases pour les bassins versant du Bouron et du Tagon.	100
Tableau IV-1 : Profondeur minimale, moyenne et maximale (m) atteinte durant la période de mesure pour les sept piézomètres sélectionnés pour l'étude.	127
Tableau IV-2 : Moyennes mensuelles des données de température et de pluviométrie aux points de la grille SAFRAN correspondant aux sept sites étudiés.	130
Tableau IV-3 : Paramètres des équations allométriques utilisés pour le Pin maritime.....	133
Tableau IV-4 : Résultats des régressions linéaires sur les chroniques piézométriques.....	140
Tableau IV-5 : Caractéristiques des peuplements échantillonnés et groupe.	140
Tableau IV-6 : Statistiques descriptives des chronologies de largeur de cernes par site et par classe d'âge.....	144
Tableau V-1 : Gamme de profondeur des piézomètres mesurés et corrections apportées sur les données.	170
Tableau V-2 : Caractéristiques des peuplements forestiers à l'aplomb des piézomètres, inventoriés en 2011	169
Tableau V-3 : Equations utilisées pour les ajustements et leurs dérivées pour le calcul de la pente en chaque point.	178
Tableau V-4 : Fréquence (C, en jour ⁻¹) et amplitudes (A, mm) des pics remarquables sur les spectres issus de l'analyse du signal piézométrique par la méthode des transformées de Fourier.	181
Tableau V-5 : Bilan hydrologique des bassins versants du Bouron et du Tagon.	185
Tableau V-6 : ETg moyenne sur la période de calcul (Début-Fin) pour tous les sites.	186
Tableau V-7 : Bilan des ET calculées selon les différentes méthodes (mm).	199
Tableau VI-1 : Bilan hydrologique pour l'ensemble du modèle, pour la rivière du Bouron, les rivières périphériques et le tronçon de Leyre représenté sur le modèle.	236
Tableau VI-2 : Erreurs commises par les différentes simulations	243
Tableau VI-3 : Bilan hydrologique annuel sur la zone simulée pour une recharge issue du bilan Thornthwaite (Thw) avec une RFU de 100 mm.	244
Tableau VI-4 : Erreurs commises par les différentes simulations	247
Tableau VI-5 : Différences observées dans les bilans hydriques annuels et la piézométrie en fonction du taux de dégâts sur les peuplements de plus de 5 ans.	250

Table des figures

Figure I-1 : Interactions nappe-végétation	20
Figure I-2 : Localisation et limites du bassin versant de la Leyre	23
Figure II-1 : Caractérisation de la typologie stationnelle des Landes de Gascogne	34
Figure II-2 : Extension du système plio-quaternaire landais et épaisseur de la zone non-saturée	38
Figure II-3 : Relation niveau de la nappe phréatique et type de végétation.....	44
Figure II-4 : Localisation des bassins versants expérimentaux du Bouron et du Tagon.....	46
Figure II-5 : Exemple de dégâts de la tempête Klaus de Janvier 2009 sur le bassin versant du Bouron..	47
Figure II-6 : Climatogramme interannuel des deux bassins versants entre 1959 et 2010.....	49
Figure II-7 : Répartition des taux de dégâts sur les bassins versants du Bouron et du Tagon, pour les tempêtes Martin (1999) et Klaus (2009).	49
Figure II-8 : Cartographie des dégâts en 1999 (IFN, 1999) sur les deux sites expérimentaux.50	
Figure II-9 : Cartographie des dégâts en 2009 (IFN/CEMAGREF, 2009) sur les deux sites expérimentaux.....	51
Figure II-10 : Localisation des points de suivi piézométrique et de mesure du débit sur le bassin versant du Bouron (haut) et le bassin versant du Tagon (bas).....	53
Figure II-11 : Schéma d'installation des capteurs HOBO.....	54
Figure II-12 : Précipitations et piézométrie sur le bassin versant du Bouron	55
Figure II-13 : Précipitations et piézométrie sur la bassin versant du Tagon	56
Figure II-14 : Photographie de la station de mesure des débits du Bouron, au Moulin du moine	59
Figure II-15 : Photographie de la station de mesure des débits du Tagon, à Biganos.	59
Figure II-16 : Lignes de courant en amont de l'échelle limnimétrique, endroit retenu pour le jaugeage en routine.	59
Figure II-17 : Débits du Bouron de 1996-2011.....	61
Figure II-18 : Débits du Tagon de 1996-2011.....	61
Figure II-19 : Résultats de la campagne de caractérisation du réseau de drainage pour le Bouron..	63
Figure II-20 : Résultats de la campagne de caractérisation du réseau de drainage pour le Tagon..	63
Figure II-21 : Cartographie des différentes sources d'informations disponibles sur l'alias pour le bassin versant du Bouron..	65
Figure II-22 : Cartographie des résultats de la campagne de caractérisation de l'alias (INRA, 2002) pour le bassin versant du Tagon.	65
Figure II-23 : Profondeur de l'alias en fonction de sa fréquence sur le bassin versant du Bouron.	67
Figure II-24 : Organigramme simplifié du modèle GRAECO.....	70
Figure II-25 : Relations nappe-rivière.	71
Figure III-1 : Distribution de l'âge des peuplements de pin maritime au moment de l'exploitation en coupe rase, et évolution entre 1987 et 2006.	86
Figure III-2 : Organigramme général du traitement réalisé pour l'obtention des cartes de la structure des âges pour les parcelles de pin maritime de 1984 à 2007	88
Figure III-3 : Taux de coupe par an (exploitation en coupe rase) pour les deux bassins versants.	94
Figure III-4 : Répartition des classes d'âge des peuplements de futaie de Pin maritime pur sur le Massif Landais pour le Cycle 5 (2005-2008, données IFN).	94
Figure III-5 : A) Diamètre quadratique moyen (cm) en fonction de l'âge, pour les cycles 3 (1988) et 4 (1998) de l'IFN et les données contemporaines issus des inventaires INRA réalisés entre 2002 et 2008, B).....	99

Figure III-6 : Cartographie des couverts en 2007 sur le bassin versant du Bouron.	103
Figure III-7 : Cartographie des couverts en 2007 sur le bassin versant du Tagon.	104
Figure III-8 : Cartographie des âges des peuplements de Pin maritime en 2007 pour le bassin versant du Bouron.	107
Figure III-9 : Cartographie des âges des peuplements de Pin maritime en 2007 pour le bassin versant du Tagon.	108
Figure III-10 : Répartition de la surface, en pourcentage de la surface forestière totale de pin maritime, par classe d'âge pour le bassin versant du Bouron (Haut) et du Tagon, (Bas) évolution entre 1987 et 2007.	110
Figure III-11 : Aire moyenne des groupements (en hectares), Aire maximale des groupements (en hectares), Nombre de groupements et Indice de Simpson pour le bassin versant du Bouron (Haut) et du Tagon (Bas) : évolution entre 1987 et 2007.	111
Figure III-12 : Aire moyenne (en hectares, à gauche), Aire maximale (en hectares, au centre) et Nombre (à droite) de groupements (i.e., après fusion des polygones adjacents par classe d'âge de 5 ans) pour le bassin versant du Bouron (Haut) et du Tagon (Bas) : évolution entre 1987 et 2007..	112
Figure III-14 : Biomasse aérienne en tonnes par hectare par classe d'âge : valeur moyenne de la classe pour les cycles 2 (1978), 3 (1988) et 4 (1998) des inventaires IFN pour la Gironde, valeur issue des données d'inventaires INRA pour 2008 sur les deux bassins versants.	113
Figure III-13 : Contribution des classes d'âge à la biomasse totale pour un hectare moyen, évolution entre 1987 et 2007.	114
Figure III-15 : Carbone moyen stocké par hectare de forêt de pin maritime sur les bassins versants du Bouron (à gauche) et du Tagon (à droite), évolution entre 1987 et 2007..	116
Figure IV-1 : Localisation des piézomètres suivis par le BRGM sur l'ensemble du Massif landais et des sept piézomètres sélectionnés pour l'étude de l'effet de la hauteur de nappe sur la productivité du Pin Maritime	126
Figure IV-2 : Profondeur de la nappe pour les piézomètres sélectionnés et classe des stations forestières correspondantes, selon les critères d'Augusto, 2006..	128
Figure IV-3 : Chroniques des piézomètres sélectionnés pour l'étude..	138
Figure IV-4 : Diamètre à 1.30 mètre des arbres échantillonnés sur tous les sites en fonction de la profondeur de nappe moyenne du site (calculée sur la période de croissance du peuplement le plus jeune) et par groupe d'âge.	139
Figure IV-5 : Analyse par placette en fonction de la profondeur moyenne par rapport au sol de la nappe..	142
Figure IV-6 : Autocorrelation pour les 20 premiers ordres (décalage en années) : moyenne pour l'ensemble des chronologies de cernes étudiées.	144
Figure IV-7 : Evolution de l'indice Ic pour chaque site entre 1947 et 2008.	145
Figure IV-8 : Sensibilité des chronologies aux paramètres hydro-climatiques.	146
Figure IV-9 : Relation entre âge de l'arbre et largeur de cerne..	149
Figure IV-10 : Evolution de l'indice Ic en fonction de l'âge pour les différents types de landes.	150
Figure V-1 : Profondeur de nappe (courbe turquoise), flux de sève (courbe verte) et pluviométrie (courbe bleue) pour le site du Bray (CarboEurope, Loustau D. et Bosc A., 2011, données non publiées) pour l'année 2004..	167
Figure V-2 : Exemple de chronique mesurée pour le site de Retis en 2009 (Juillet).....	175
Figure V-3 : Exemple d'ajustements pour 3 sites.	177
Figure V-4 : Spectre des amplitudes en fonction des fréquences obtenues pour le piézomètre Les Gestets, sur la période du 10 juin 2011 au 24 juin 2011, à partir d'une analyse par transformées de Fourier..	180

Figure V-5 : Amplitude des oscillations retrouvées pour la fréquence 1 cycle par jour à partir de l'analyse par transformées de Fourier du signal piézométrique pour les étiages 2009 à 2011..	182
Figure V-6 : Amplitudes des oscillations en fonction de la profondeur de la nappe pour chaque site et chaque année étudiée.	183
Figure V-7 : Amplitudes des oscillations en fonction de la pluviométrie cumulée sur la période (15 jours) pour chaque site et chaque année étudiée.....	184
Figure V-8 : Graphiques supérieurs : Comparaison de l'ETR calculée avec le modèle GRAECO et l'ETg estimée à partir des oscillations journalières de la nappe. La ligne verticale (en rouge) représente la date pour laquelle un décrochage entre ETR et ETg est observé. Graphiques inférieurs : relation ETR-ETg.	187
Figure V-9 : Exemple des variations du diamètre lors de belles journées en juin 2010 pour le Pin maritime (site de Bilos, Source : V. Moreaux).....	193
Figure VI-1 : Comparaison des débits du Bouron et du Tagon avant et après la tempête de 1999 : (A) Débits spécifiques moyens mensuels entre 1996 et 2005, (B) Relation entre les débits spécifiques journaliers du Bouron et du Tagon, avant et après la tempête 1999.	206
Figure VI-2 : Isohypes du toit du Miocène, mise à jour de la carte établie par Besbès en 1963 à partir des forages BSS, pour le bassin versant du Bouron.	212
Figure VI-3 : Coupes stratigraphiques schématiques sur le bassin versant du Bouron	214
Figure VI-4 : Situation et coupes de forages extraites de la base BSS du BRGM.....	216
Figure VI-5 : Epaisseur de la formation aquifère plio-quaternaire sur le bassin versant du Bouron	217
Figure VI-6 : Isopièzes de l'aquifère plio-quaternaire sur le bassin versant du Bouron, en relation avec la topographie du substratum entre le 16 juin 2009 et le 21 septembre 2010.	218
Figure VI-8 : Comparaison des valeurs données par le MNT (BD TOPO) et les valeurs mesurées par GPS avec corrections différentielles.....	221
Figure VI-7 : Carte des types de lande réalisée à partir de l'étude de l'épaisseur de la zone non saturée sur le bassin versant du Bouron.....	222
Figure VI-9 : Coupes piézométriques sur le bassin versant du Bouron	223
Figure VI-10 : Comparaison des données historiques et des données calculées en 2009-2010 : A) limites du bassin versant hydrologique, B) limites du bassin versant topographique. En fond de carte, le MNT issu de la base de données Scan25 de l'IGN (maille 25*25m).	224
Figure VI-11 : Comparaison du réseau de surface observé : A) pendant l'hiver 2008-2009 et l'hiver 2010-2011, B) observé par Casenave en 1970.....	226
Figure VI-12 : Carte piézométrique à l'étiage, le 07/10/2010, prenant en compte les mesures réalisées dans les piézomètres INRA, BRGM et les mesures de la hauteur d'eau dans la rivière.	228
Figure VI-13 : Carte piézométrique en crue, le 02/02/2011, prenant en compte les mesures réalisées dans les piézomètres INRA, BRGM et les mesures de la hauteur d'eau dans la rivière.	229
Figure VI-14 : Conditions aux limites du modèle sur le bassin versant du Bouron	232
Figure VI-15 : Répartition spatiale du paramètre transmissivité T, en m ² /s	236
Figure VI-16 : Correspondance entre piézométrie mesurée et piézométrie simulée par NEWSAM.....	236
Figure VI-17 : Résultats de la simulation en régime permanent: (A) Charges hydrauliques simulées et charges hydrauliques observées en février 2011, (B) Débit de chaque maille	

rivière (en m ³ /s), (C) différence entre cote imposée et cote calculée aux mailles rivière (en mètres).	238
Figure VI-18 : Répartition spatiale du paramètre S, sans unité.	240
Figure VI-19 : Comparaison des charges hydrauliques simulées (trait noir continu) et mesurées (ligne pointillée de couleur), au pas de temps mensuel., extraits présentés entre 1995 et 2010 (graphiques de gauche) et 2009-2010 (graphiques de droite).....	242
Figure VI-20 : Comparaison des débits simulés (bleus) et des débits observés (noir) à l'exutoire du Bouron au pas de temps mensuel.	243
Figure VI-21 : Test de sensibilité à la recharge, simulation au pas de temps mensuel sur la période 1980-2010.	246
Figure VI-22 : Nouvelle répartition spatiale du paramètre S, sans unité.	247
Figure VI-23 : Comparaison des charges hydrauliques simulées (trait noir continu) et mesurées (ligne pointillée de couleur), au pas de temps journalier.	248
Figure VI-24 : Comparaison des débits simulés (bleus) et des débits observés (noir) à l'exutoire du Bouron au pas de temps journalier.	249

Annexes

Annexe A

A-1 : Valeurs de F, coefficient de correction fonction de la latitude et du mois pour le calcul de l'ETP de Thornthwaite pour la région de Bordeaux.

A-2 : Résultats de l'analyse par classification ascendante hiérarchique de la composition du sous-bois.

A-3: Largeur de cerne (LC) mesurée pour toutes les carottes par site.

A-4 : Exemple de standardisation pour l'étude dendrochronologique (Cas du site de Biganos).

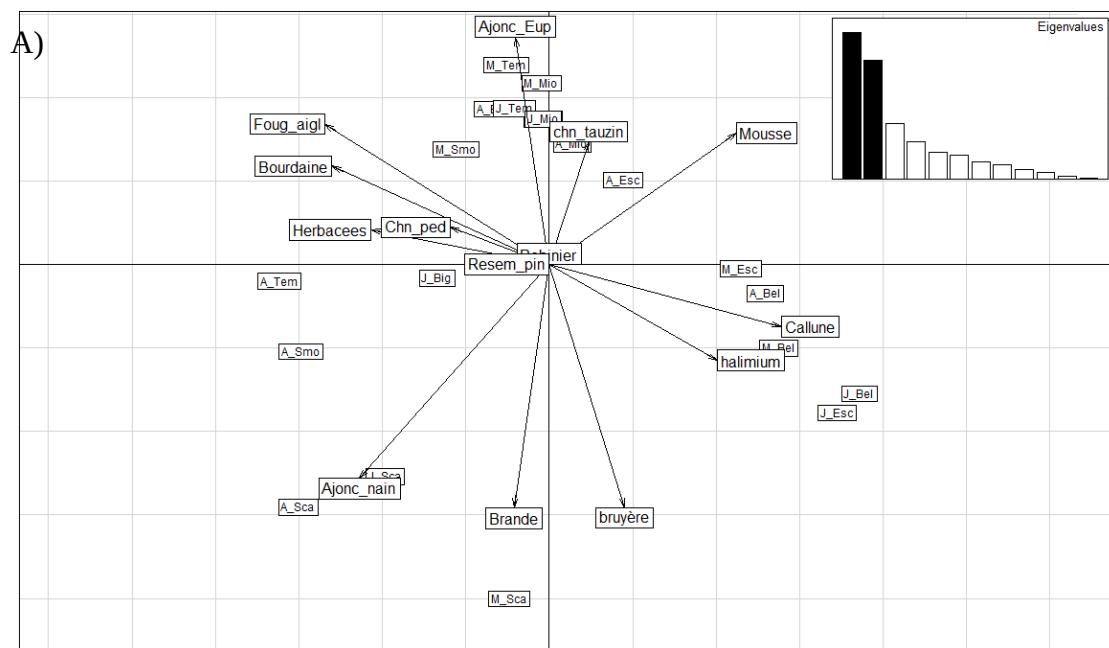
A-5 : Chronoséquence des paramètres météorologiques SAFRAN, de l'indice de largeur de cerne, et du nombre d'observations ayant permis le calcul de la moyenne pour chaque site.

A-6 : Evolution de l'indice Ic en fonction de l'année calendaire pour les différents types de lande.

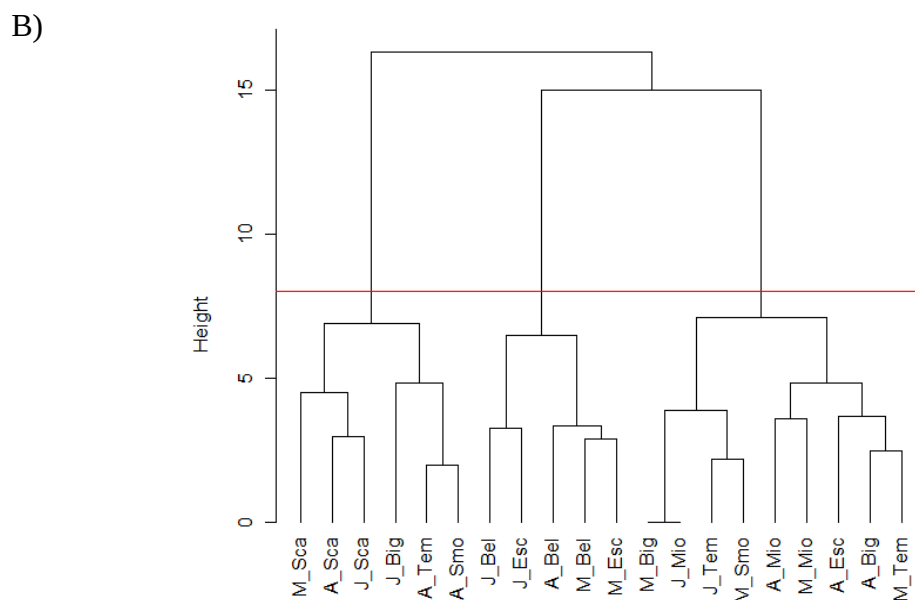
A-1 : Valeurs de F, coefficient de correction fonction de la latitude et du mois pour le calcul de l'ETP de Thornthwaite pour la région de Bordeaux (44°N).

	F
Janvier	0.81
Février	0.82
Mars	1.02
Avril	1.13
Mai	1.27
Juin	1.29
Juillet	1.3
Aout	1.2
Septembre	1.04
Octobre	0.95
Novembre	0.8
Décembre	0.76

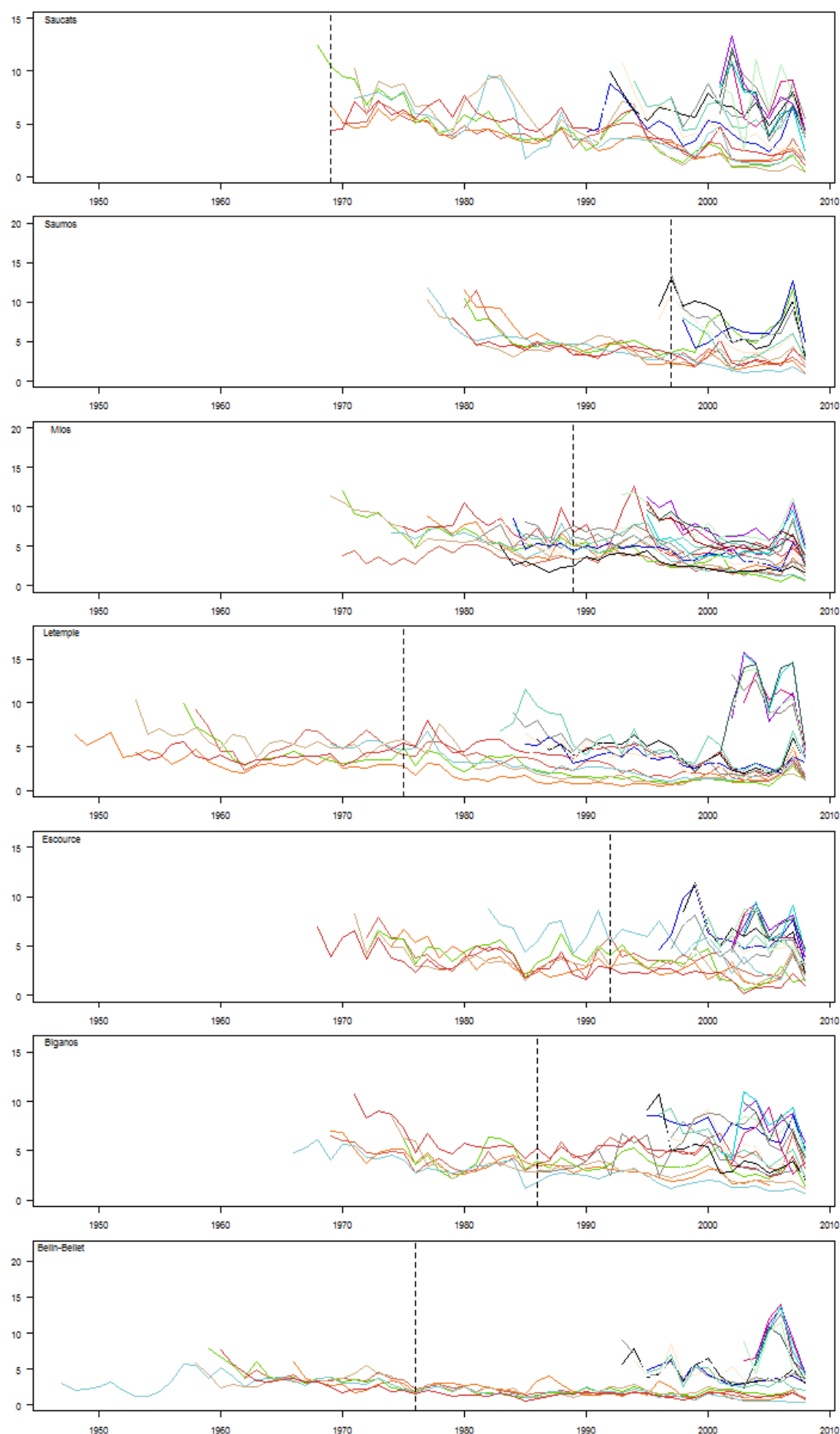
A-2 : Résultats de l'analyse par classification ascendante hiérarchique de la composition du sous-bois avec la librairie OrdiClust du logiciel R : A) Représentation des sites et des espèces sur le plan F1xF2, dans l'encart en haut à droite, la variante expliquée par les axes choisis B) Dendrogramme des placettes, la barre rouge représente le niveau de coupure de l'arbre.



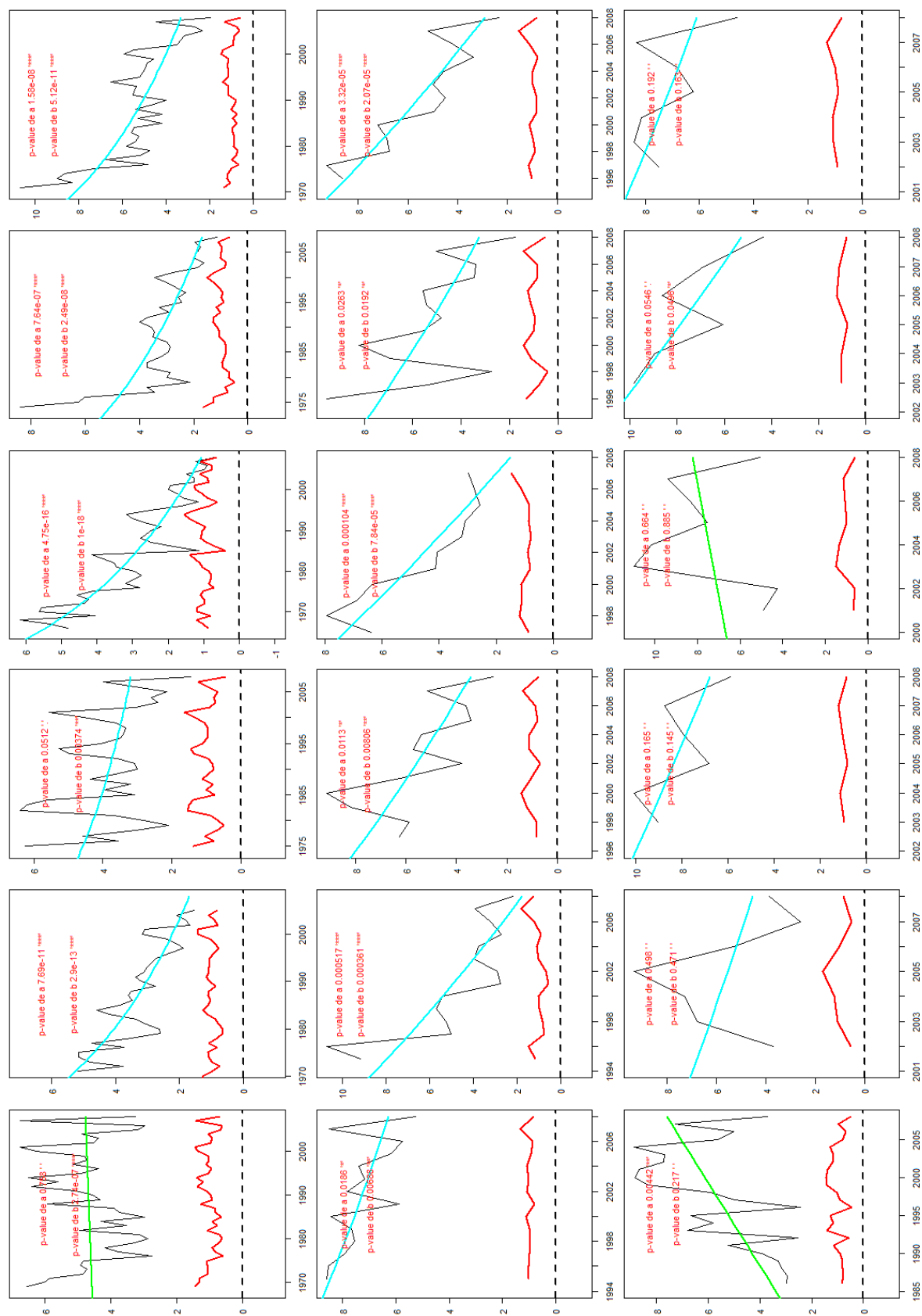
Cluster Dendrogram



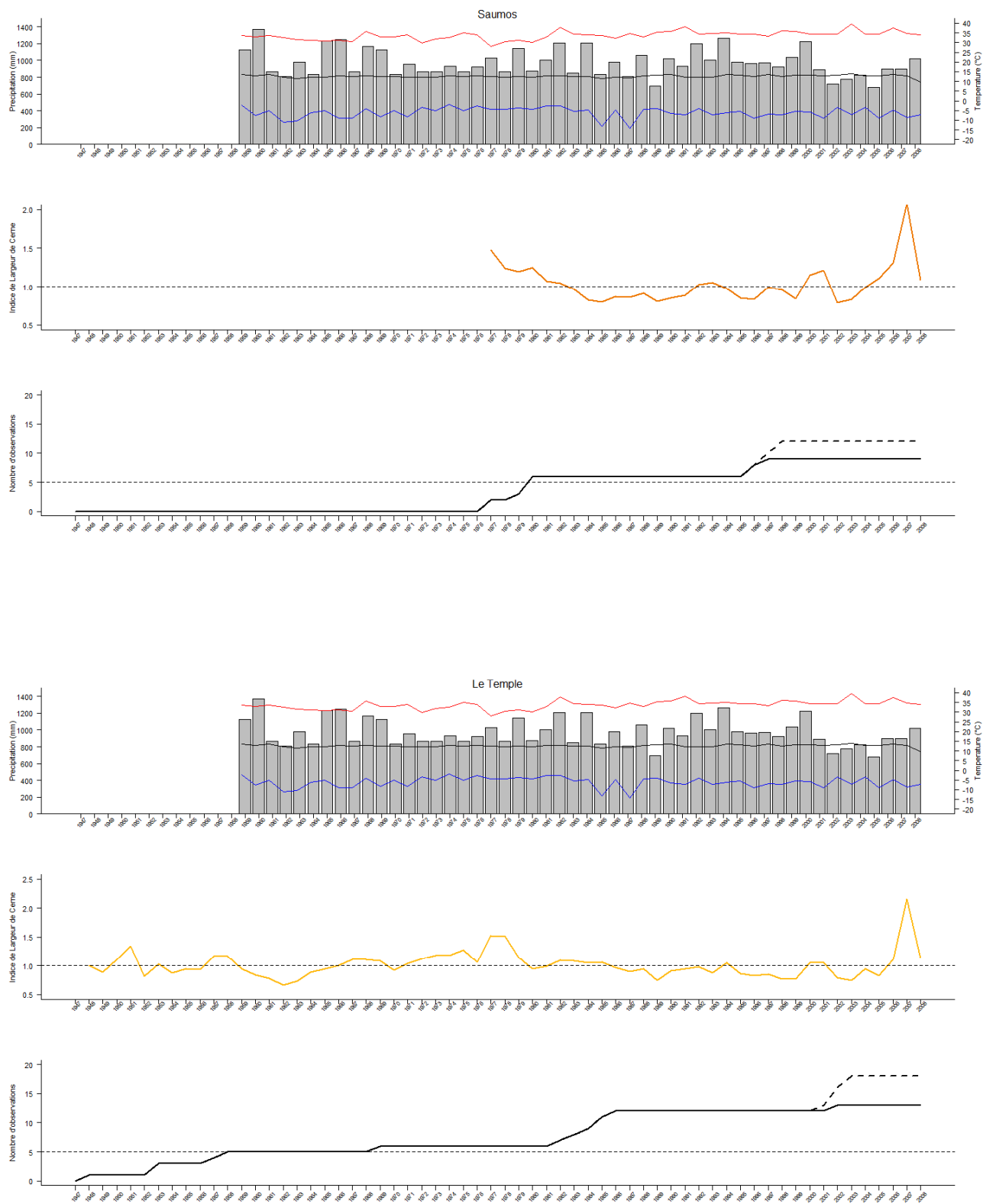
A-3 : Largeur de cerne (LC) mesurée pour toutes les carottes par site. La ligne pointillée figure la donnée piézométrique la plus ancienne.

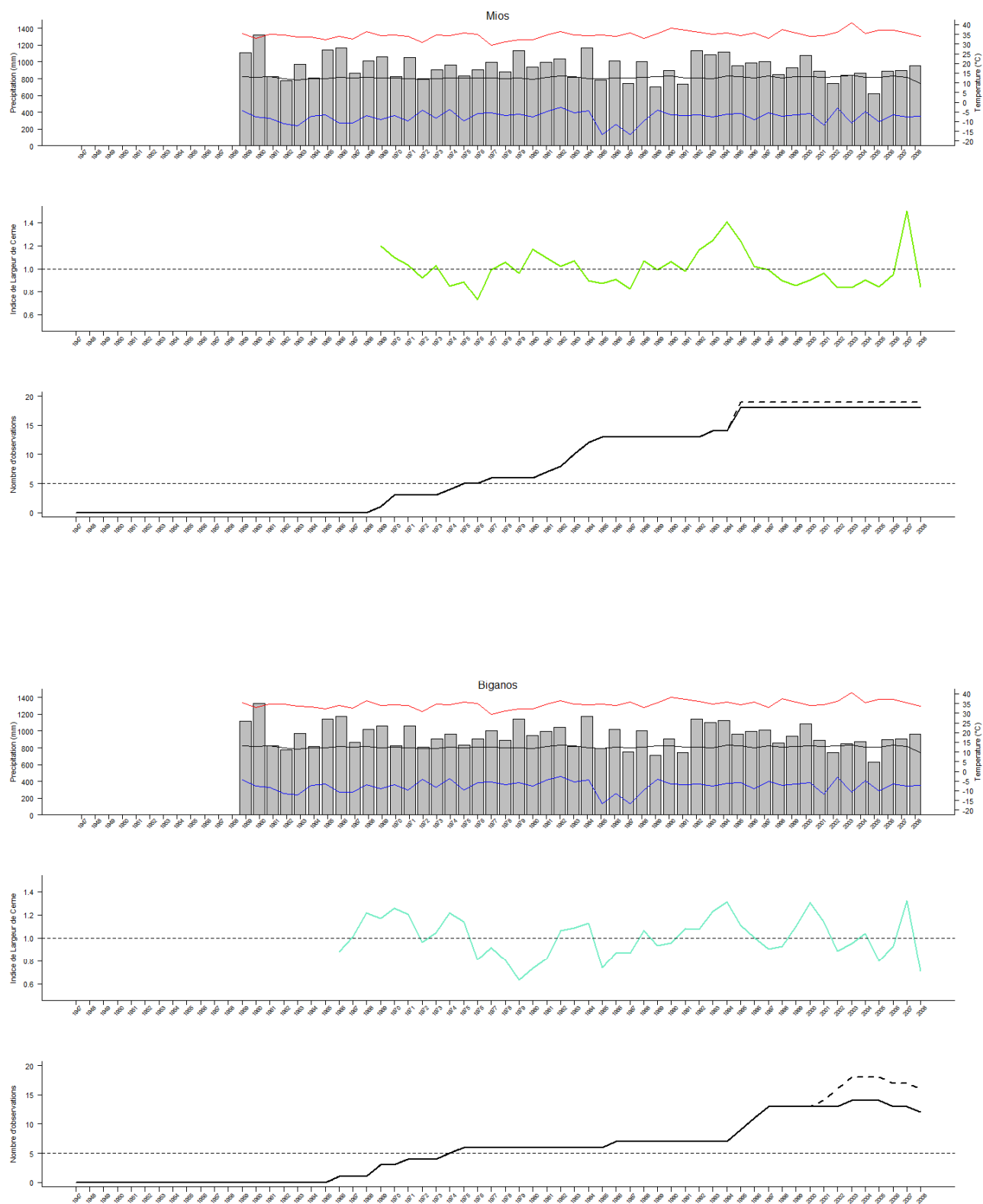


A-4: Exemple de standardisation pour l'étude dendrochronologique (Cas du site de Biganos). Une exponentielle négative est ajustée sur chacune des chroniques de largeur de cernes issue des 18 carottes prélevées autour du piézomètre. L'indice Ic (courbe rouge) correspond au rapport entre modèle (courbe bleue) et la LC mesurée (courbe noire). S'il n'est pas possible d'ajuster une exponentielle négative, une droite est ajustée, sans condition sur la pente selon la méthodologie de Fritts (1969).

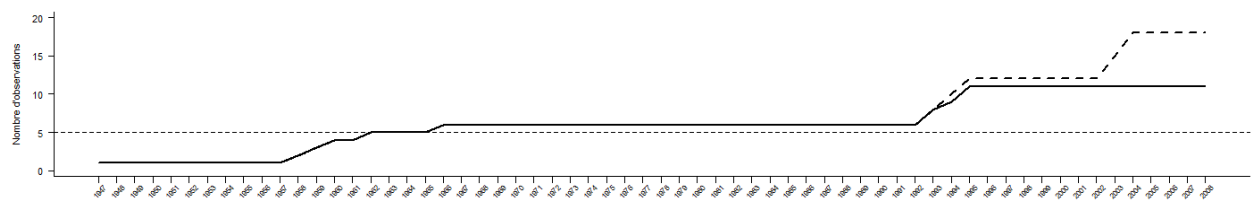
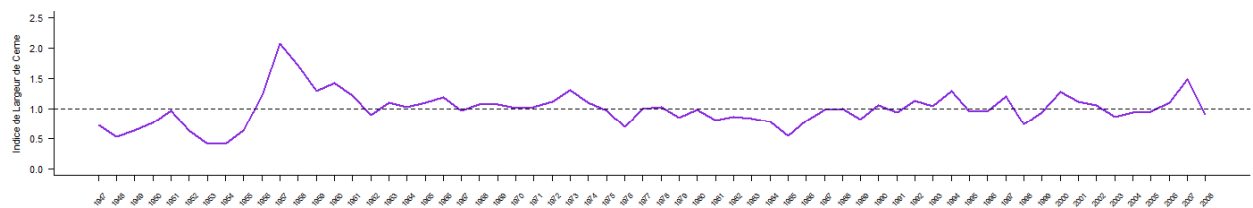
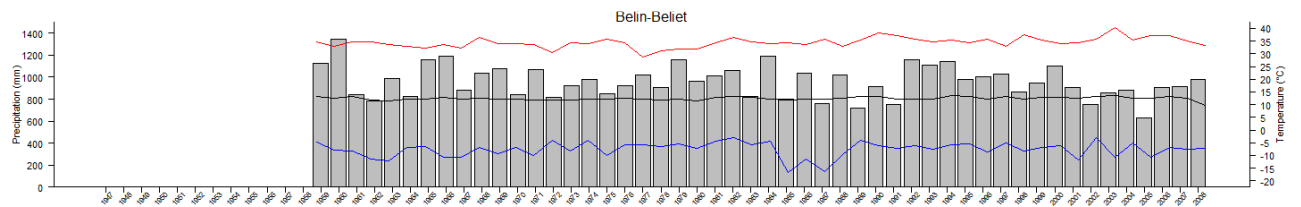
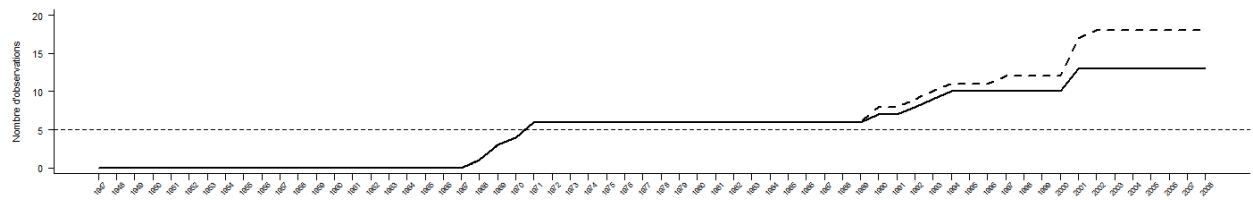
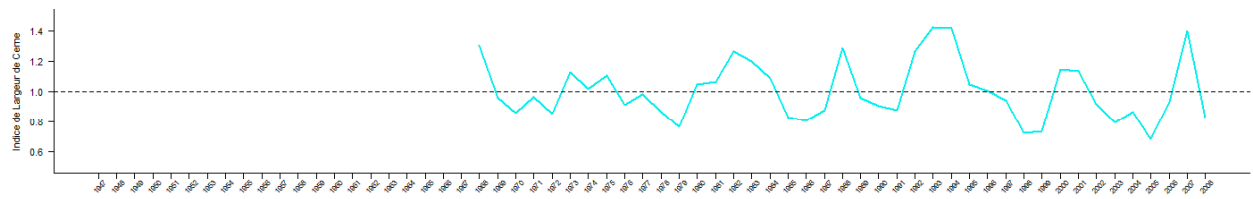
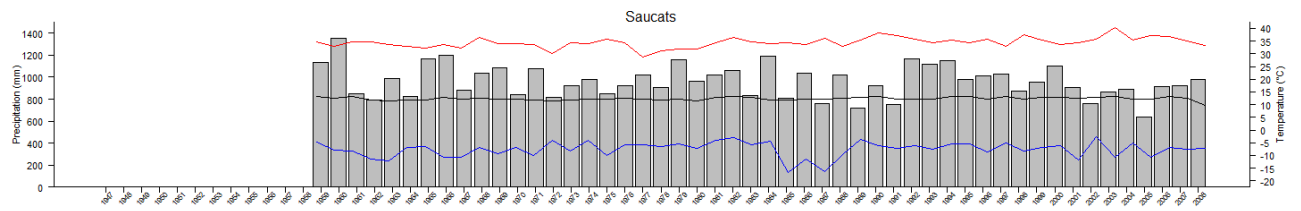


A-5 : Chronoséquence des paramètres météorologiques SAFRAN (Courbes : moyenne en noir, maximum en rouge, minimum en bleu, des températures annuelles ; Histogramme : somme des précipitations annuelles), de l'indice de largeur de cerne, et du nombre d'observations ayant permis le calcul de la moyenne pour chaque site (en pointillés le nombre d'observations initiales).

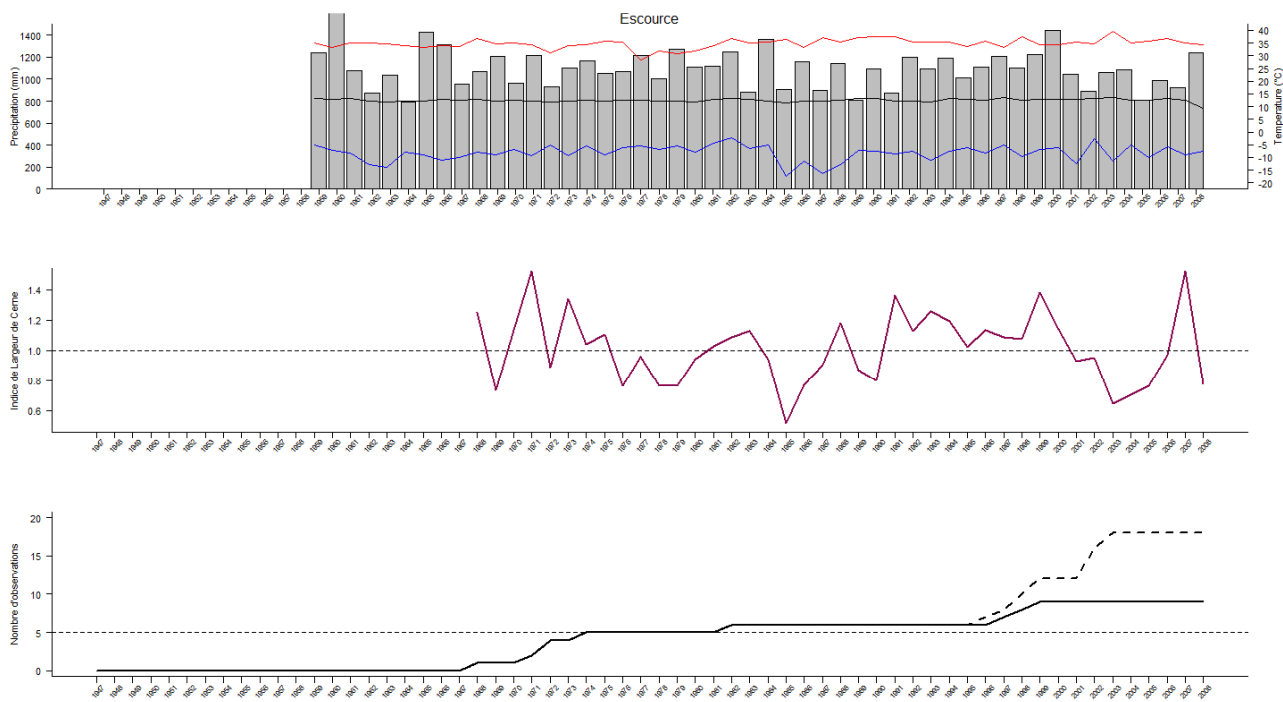


A-4 : Suite

A-4 : Suite



A-4 : Suite et fin

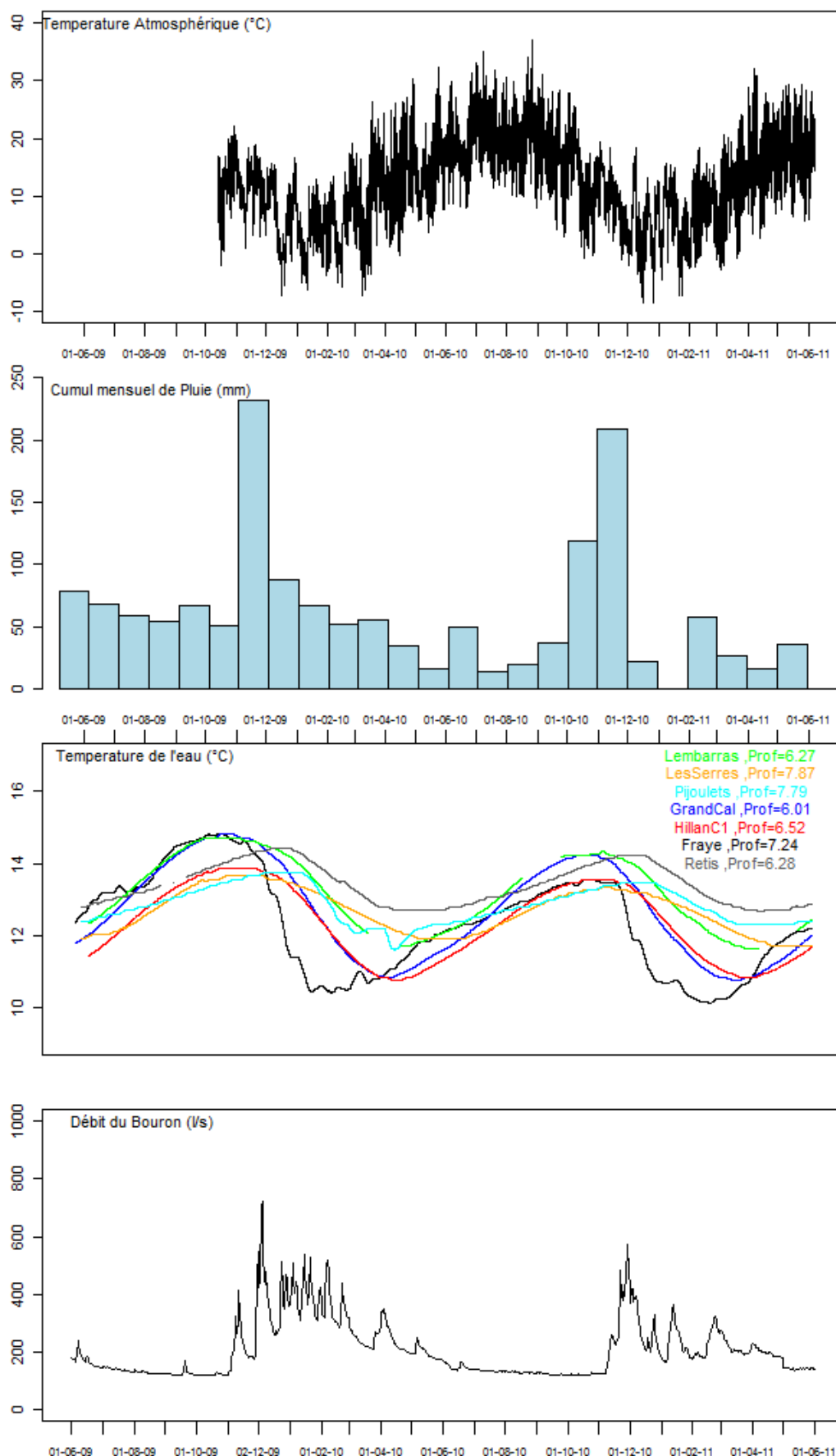


A-6 : Evolution de l'indice Ic en fonction de l'année calendaire pour les différents types de landes.



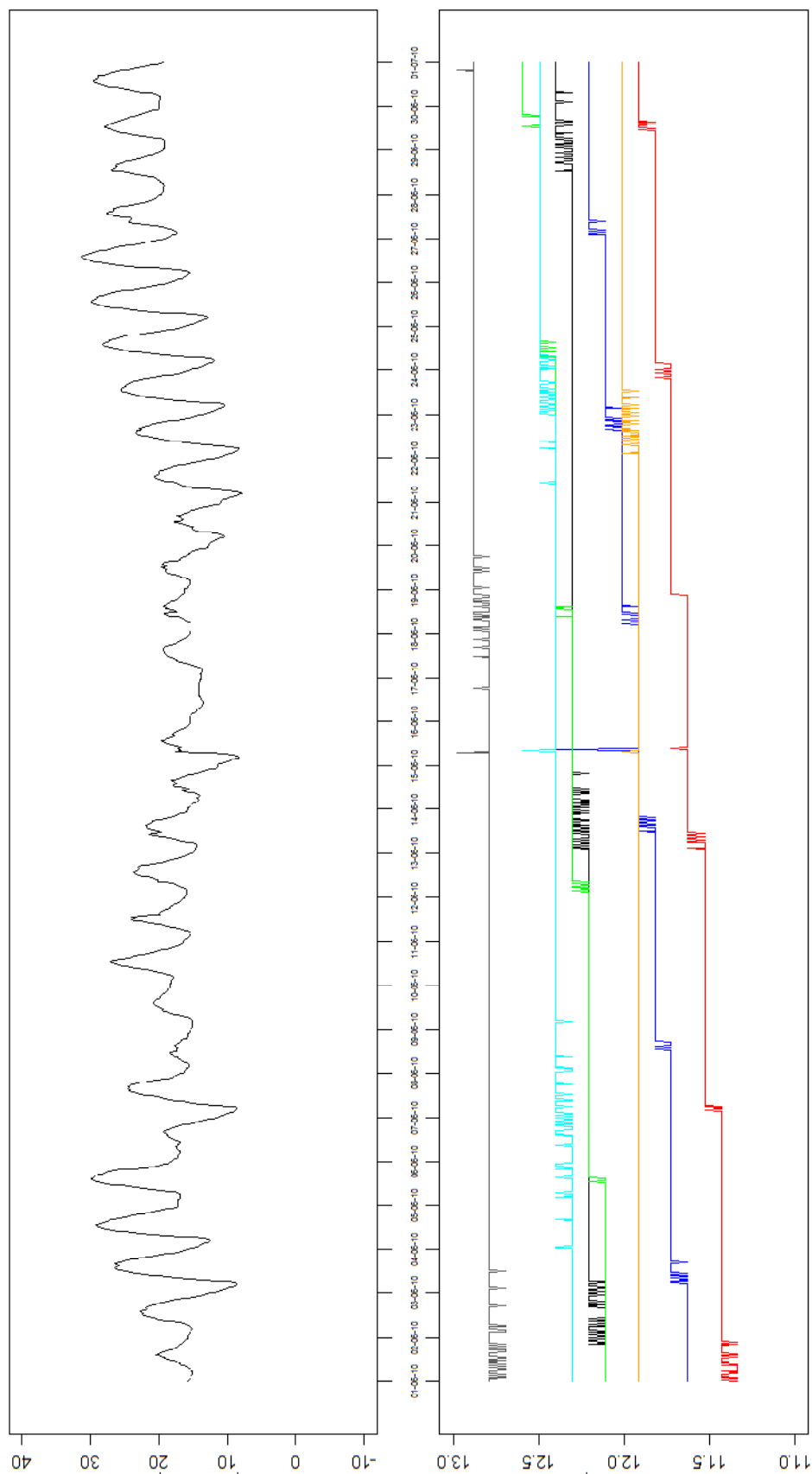
Annexe B

- B-1 : Température atmosphérique, Cumul mensuel de pluie, Température de l'eau dans les piézomètres, Débit du bassin versant du Bouron pour la période de juin 2009 à juillet 2011
- B-2 : Mesure de la température atmosphérique (en haut) et de la température dans les piézomètres (en bas). Le 15 juin 2010, un relevé des mesures a été réalisé. Pour la signification du code couleur, voir Figure 5.4
- B-3 : Modélisation du contenu en eau du sol par la méthode de l'indice des précipitations antérieures, pour le site du Bray.



B-1 : Température de l'air à 1.5 m (°C), cumul mensuel de pluie (mm), température de l'eau dans les piézomètres (°C), et débit du bassin versant du Bouron (l/s) pour la période de juin 2009 à juillet 2011. Prof correspond à la profondeur de la sonde par rapport au sol.

B-2 : Mesure de la température atmosphérique (en haut) et de la température dans les piézomètres (en bas). Le 15 juin 2010, un relevé des mesures a été réalisé. Pour la signification du code couleur, voir Figure B-1



B-3 : Modélisation du contenu en eau du sol par la méthode de l'indice des précipitations antérieures, pour le site du Bray.

Les calculs réalisés ici se basent sur les formules décrites par Chevallier (1983), utilisant la méthodologie mise au point par Hohler et Linsley (1951) :

$$API_i = API_o * k^i, \text{ pour les jours sans pluie}$$

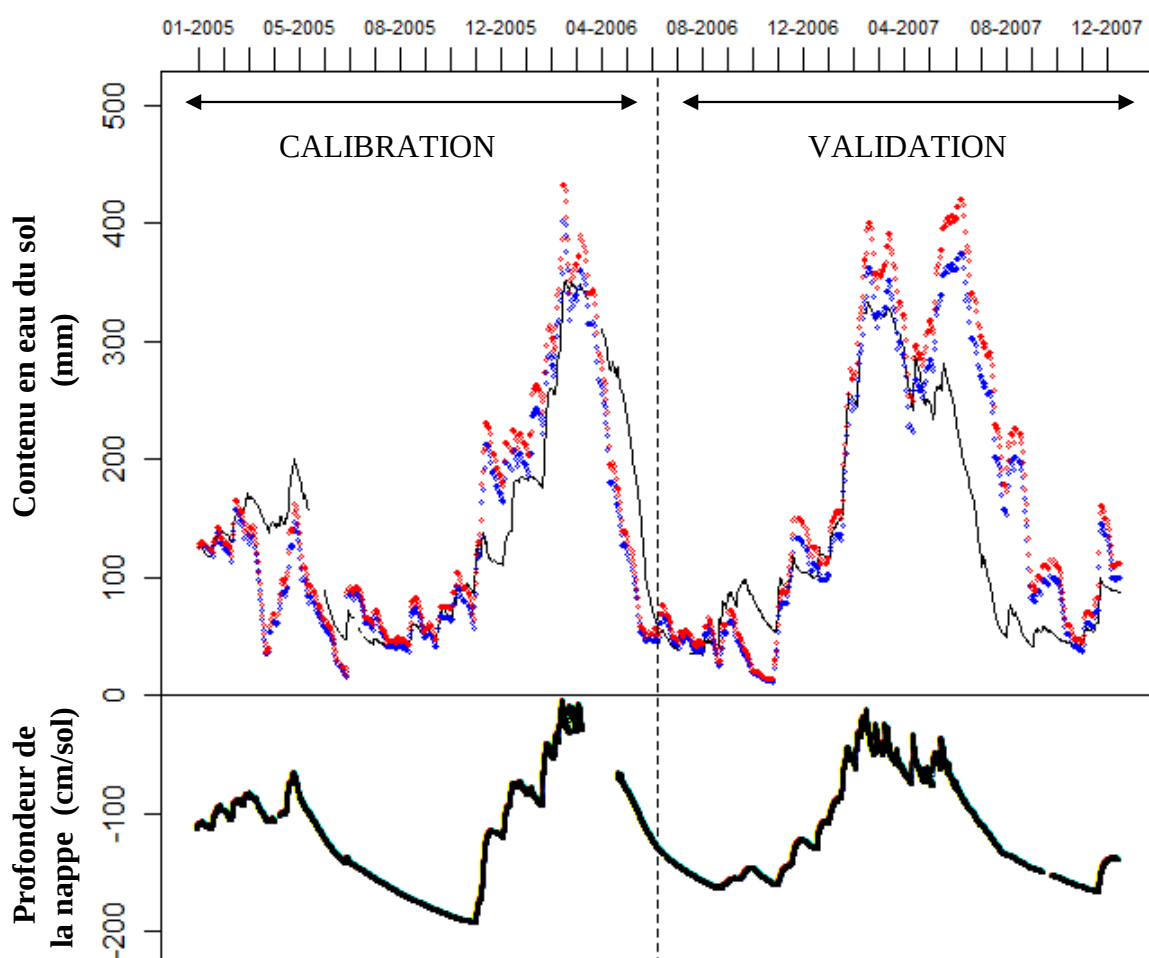
$$API_i = API_o + P, \text{ pour les jours avec pluie}$$

k est une constante positive et strictement inférieure à 1, i est le $i^{\text{ème}}$ jour en l'absence de précipitations. La valeur d' API est forcément journalière. Le jeu de données doit être séparé en deux : une partie calage, une partie test. La date du 1er juillet 2006 a été sélectionnée, car la période antérieure englobait des conditions sèches et des conditions humides.

Une régression linéaire est utilisée pour trouver k , comme décrit dans Chevallier (1983) : pendant les périodes sans précipitations, en posant $t=1$: $API_i = API_o * k$. On peut donc estimer k en considérant que l'indice d'un jour est égal à l'indice du jour précédent multiplié par un facteur k . C'est la courbe rouge ci-dessous.

Les pluies incidentes peuvent être modifiées en prenant en compte l'interception par le couvert I : $I = 49.505 * P^{-0.827}$ (Courcoux, 1982). C'est la courbe bleue ci-dessous.

Les mesures correspondent aux lignes noires continues : contenu en eau du sol (trait fin) et profondeur de la nappe (trait épais).



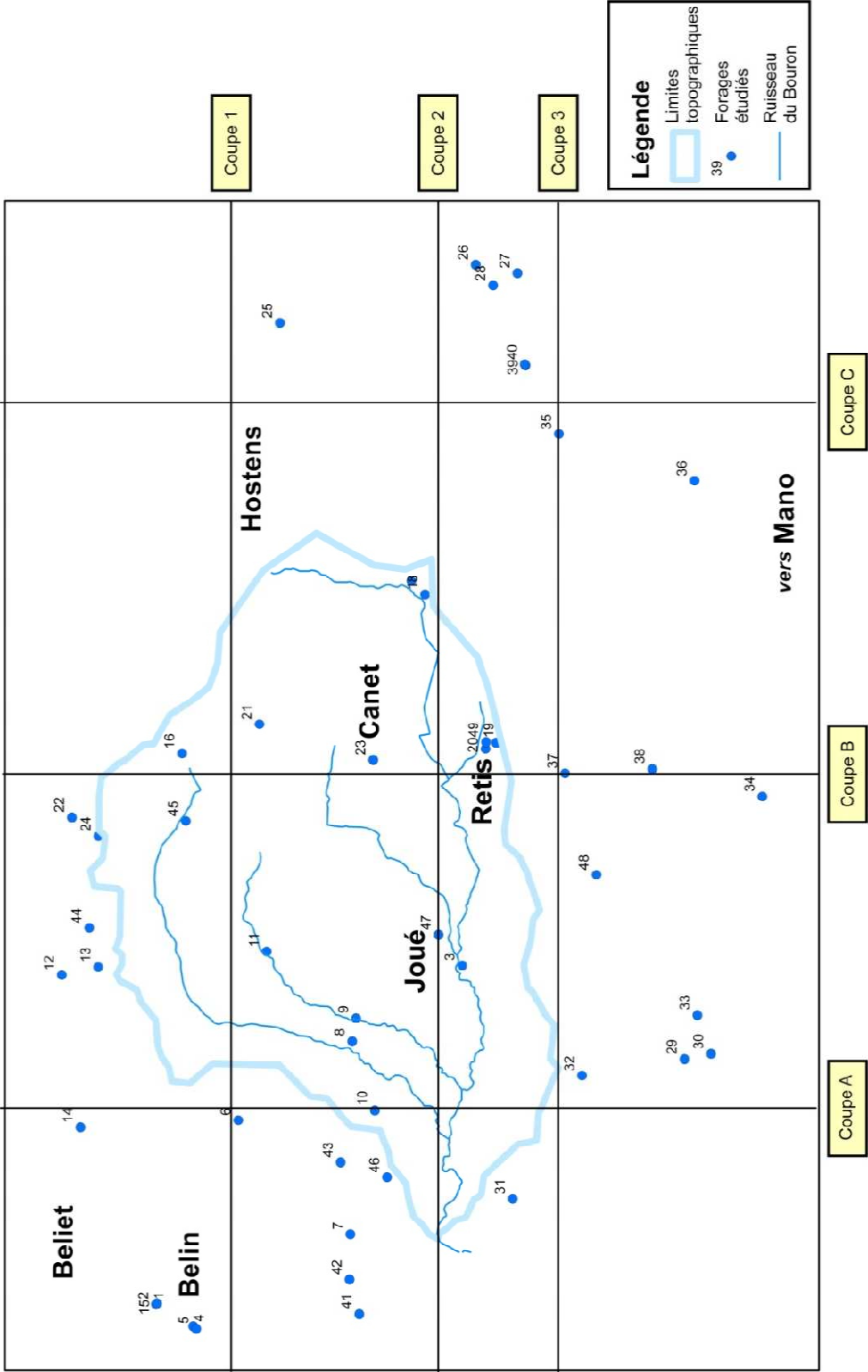
Annexe C

- C-1 : Forages utilisés pour caractériser la litho-stratigraphie sur le bassin versant du Bouron. Les coordonnées (X, Y) sont données en Lambert II étendu.
- C 2 : Localisation de tous les forages étudiés sur le bassin versant du Bouron et emplacement des coupes géologiques.

C-1 : Forages utilisés pour caractériser la litho-stratigraphie sur le bassin versant du Bouron. Les coordonnées (X, Y) sont données en Lambert II étendu.

Numéro	Nom	CODE_BSS	X	Y	TYPE	Cote en mètres NGF	Profondeur en mètres NGF
1	Belin	08508X001/F	351234.00	1949149.00	Forage	47.52	11.32
2	NA	08508X002/F2	351234.00	1949149.00	Forage	47.52	3.07
3	NA	08508X0013/F	355711.00	1945109.00	Forage	40.00	4.00
4	NA	08508X0014/S1	350944.00	1948660.00	Sondage	32.60	22.10
5	NA	08508X0015/S2	350913.00	1948620.00	Sondage	33.20	18.20
6	NA	08508X0016/SEB	353664.00	1948064.00	Forage	54.00	-1.00
7	NA	08508X0028/F55	352161.00	1946586.00	Sondage	42.00	39.00
8	NA	08508X0030/F59	354713.00	1946561.00	Sondage	51.00	48.00
9	NA	08508X0031/F60	355013.00	1946511.00	Sondage	51.00	47.80
10	NA	08508X0055/B1	353791.00	1946263.00	Sondage	49.00	8.00
11	NA	08508X0056/B2	355896.00	1947690.00	Sondage	56.00	15.00
12	NA	08508X0057/B3	355580.00	1950393.00	Sondage	61.00	20.00
13	NA	08508X0062/NO20	335689.00	1949912.00	Sondage	60.00	54.00
14	NA	08508X0084/S6	353568.00	1950146.00	Sondage	55.00	43.00
15	NA	08508X0098/F2	351245.00	1949138.00	Forage	48.00	9.00
16	NA	08515X0001/F	358509.00	1948806.00	Forage	64.60	23.55
17	Canet	08515X0002/F	360796.00	1945780.00	Forage	69.00	40.00
18	NA	08515X0006/F2	360615.00	1945600.00	Forage	73.00	39.00
19	NA	08515X0009/F	358652.00	1944663.00	Forage	65.50	44.50
20	NA	08515X0010/F	358572.00	1944803.00	Forage	66.00	44.60
21	NA	08515X0041/F9	358898.00	1947785.00	Sondage	74.00	61.50
22	NA	08515X0043/HO-13	357672.00	1950259.00	Sondage	58.00	21.00
23	NA	08515X0044/HO-14	358425.00	1946285.00	Sondage	68.00	34.00
24	NA	08515X0045/NO19	357421.00	1949909.00	Sondage	68.50	62.50
25	NA	08516X0001/F	364201.00	1947515.00	Forage	77.00	45.00
26	NA	08516X0007/S17	364968.00	1944932.00	Sondage	81.00	66.50
27	NA	08516X0010/S19	364862.00	1944382.00	Sondage	79.00	63.50
28	NA	08516X0011/S18	364697.00	1944703.00	Sondage	80.00	63.00
29	NA	08744X0002/FBIN1	354475.00	1942178.00	Forage	48.98	-55.00
30	NA	08744X0004/S	354544.00	1941827.00	Sondage	48.00	-201.00
31	NA	08744X0005/PZE	352629.00	1944445.00	Piézomètre	43.50	36.30
32	NA	08744X0020/PA11	354257.00	1943530.00	Sondage	51.00	29.00
33	NA	08744X0021/PA34	355055.00	1942007.00	Sondage	48.00	7.00
34	NA	08751X0004/S	357946.00	1941151.00	Sondage	56.00	-164.00
35	NA	08751X0016/F1	362734.00	1943835.00	Forage	72.00	62.50
36	NA	08751X0026/SY11	362111.00	1942045.00	Sondage	63.00	23.00
37	NA	08751X0028/SY14	358251.00	1943753.00	Sondage	59.00	29.50
38	NA	08751X0029/F	358309.00	1942602.00	Forage	57.50	-4.50
39	NA	08752X0141/S1	363638.00	1944276.00	Forage	75.00	41.00
40	NA	08752X0143/F	363650.00	1944285.00	Forage	75.97	59.97
41	Houdoua	NA	358469.81	1948906.64	Forage	60	10.00
42	Belin_N53	NA	351109.74	1946467.81	Sondage	39.70	28.70
43	Belin_N54	NA	351560.33	1946597.10	Sondage	38.30	33.50
44	Belin_N58	NA	353111.76	1946714.41	Sondage	47.80	45.47
45	Lembarras	NA	356207.35	1950029.68	Piézomètre	63.29	55.29
46	Pijoulets	NA	357623.31	1948756.88	Piézomètre	63.74	55.74
47	GrandCal	NA	352912.64	1946102.41	Piézomètre	44.31	36.31
48	Fraye	NA	356117.27	1945421.62	Piézomètre	52.30	44.30
49	LesSerres	NA	356907.95	1943339.10	Piézomètre	55.35	47.35
50	Retis	NA	358660.73	1944796.39	Piézomètre	65.79	56.79

C-2 : Localisation de tous les forages étudiés sur le bassin versant du Bouron et emplacement des coupes géologiques.



NOTES