

THÈSE

Présentée à

**L'UFR DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ**

Pour obtenir le

**GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
DE FRANCHE-COMTÉ**

**Spécialité : Sciences de la Vie et de l'Environnement
École doctorale Homme – Environnement – Santé**

**ANALYSE DES CRITÈRES DE DÉFINITION DE
LA ZONE D'APPELLATION D'ORIGINE
CONTROLÉE DES RÉSINEUX DU MASSIF DU
JURA PAR LES FACTEURS ÉCOLOGIQUES
ET APPLICATION À SA DÉLIMITATION**

par

Marc BRIOT

Soutenue le 07/12/2009 devant la commission d'Examen :

**Directeur de Thèse
Co-Directeur de Thèse
Rapporteurs**

Examineurs

P.-M. BADOT	Professeur, Université de Franche-Comté
E. LUCOT	Maître de Conférences, Université de Franche-Comté
J.-M. GOBAT	Professeur, Université de Neuchâtel (Suisse)
P. FAIVRE	Professeur, Université de Savoie
P. CHERY	Maître de Conférences, ENITA Bordeaux
H. RICHARD	Directeur de Recherches CNRS, Université de Franche-Comté



Chrono-Environnement - UMR 6249 UFC/CNRS usc INRA
Université de Franche-Comté
Place Leclerc
25030 BESANCON CEDEX – France

Courriel : marc.briot@univ-fcomte.fr
Téléphone : (+33) (0)3 81 66 57 14



Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier, Pierre-Marie Badot et Eric Lucot pour m'avoir donné ma chance dans le milieu de la recherche et pour m'avoir donné leur confiance pour cette étude. Cette expérience qui m'aura beaucoup apporté et qui au-delà de ce travail, m'aura permis de dépasser certaines limites et d'apprendre à me connaître.

Un grand merci à mes deux rapporteurs qui ont bien voulu me faire l'honneur d'accepter de rapporter ce travail ainsi que pour leurs remarques constructives.

Je tiens à remercier l'Union Européenne et le programme INTERREG France-Suisse, l'Association régionale pour le Développement de la forêt et des Industries du Bois en Franche-Comté ainsi que le Conseil Régional de Franche-Comté pour leur soutien financier.

Je tiens également à remercier tout le laboratoire « Chrono-environnement » (anciennement le LBE) et tous mes collègues pour m'avoir accueilli durant ces cinq longues années. J'en garderai de nombreux souvenirs comme les discussions constructives que j'ai pu avoir dans la salle café et qui m'auront parfois permis de prendre du recul sur mon travail grâce à des points de vue différents...

Un grand merci, aux techniciens (Jean-Claude Lambert et Dom' Rieffel) qui m'ont rendu un grand service lorsqu'ils m'ont accompagné sur terrain et pour m'avoir tenu compagnie lors de certains de mes repas champêtres.

Que dire aussi de la communauté de doctorants (Micha, Fred', Hung, Sam, Amélie, Clèm', Claire, Olivier, Caroline ... et tous les petits jeunes qui sont arrivés ensuite) qui a su rester soudée dans la difficulté ? Continuez à vous serrer les coudes et courage à ceux qui n'ont pas encore soutenu !

Pour finir, je tiens à remercier tous mes proches, ma famille et mes amis, pour leur encouragements soutenus jusqu'au bout et pour ce travail qui a semblé sans fin.

Résumé

Depuis 2001, les produits forestiers peuvent, au même titre qu'un produit alimentaire, prétendre à une reconnaissance en Appellation d'Origine Contrôlée (AOC). Comme le laissait supposer les études de notoriété des bois résineux du massif du Jura, les premières études sur leur résistance mécanique les classent parmi les meilleurs bois d'Europe. Cette étude a permis de déterminer les critères écologiques déterminant les spécificités des bois du Jura afin de permettre aux gestionnaires d'appuyer la future délimitation de l'AOC sur des éléments objectifs. La démarche scientifique s'appuie sur les études antérieures de caractérisation des terroirs viticoles (Vaudour, 2002) et fromagers (Monnet, 1996). Les critères écologiques pris en compte sont principalement les données climatiques et pédologiques. Un protocole de cartographie des sols forestiers du massif jurassien a été défini de façon stratifié et hiérarchisé. Il est basé sur la variabilité des compartiments géologiques et la topographie (unité "géo-topographique"). Le massif a été découpé en quatre zones de référence à l'intérieur desquelles un échantillonnage a été réalisé pour décrire la diversité et l'abondance des sols dans chaque unité géo-topographique aboutissant à 13 unités complexes de sols (UCS). La description morphologique des sols a été réalisée pour évaluer leurs propriétés édaphiques, à l'aide d'un indice synthétique (CERU). Sur la base de ces données, 27 stations représentatives ont été sélectionnées pour leur variabilité des conditions locales sur l'ensemble du massif pour préciser les relations entre les conditions stationnelles et les caractéristiques du peuplement sylvicole. Sur chaque station, une étude détaillée du sol est réalisée (description du profil, pierrosité, carte systématique de la profondeur). Les arbres sont mesurés et localisés avec précision à l'intérieur de la station. Les mesures dendrométriques ont été complétées par des mesures ultrasonores de qualité mécanique du bois. Les résultats ont montré qu'il existe une influence significative de la richesse nutritive de la station et de la réserve utile individuelle sur la densité du bois de résineux du massif. Les arbres présentent une densité plus importante lorsqu'ils sont localisés sur des stations au pH_{eau} élevé et ayant accès à un volume de sol important. La répartition géographique des stations d'étude a permis de montrer qu'il n'existait pas d'effet de l'altitude. A conditions pédologiques voisines, il n'y aura pas de différence entre deux stations à des altitudes différentes. L'ensemble des conditions écologiques est homogène à l'échelle du massif du Jura, malgré une variabilité qui peut s'avérer importante à une échelle locale. Cette étude a également confirmé que les sapins et les épicéas du massif étaient des arbres d'une grande qualité selon une variabilité relativement faible. De part son contexte (précipitations importantes, roche calcaire, gamme d'altitude moyenne, pentes variées et sols brunifiés), le terroir jurassien est original. Au-delà du zonage AOC "Bois du Jura", ces données apportent des informations nouvelles sur les relations propriétés des sols et les roches et sur la dimension spatiale des relations sol-arbre.

Mots clés : AOC, qualité du bois, cartographie du sol, changement d'échelle, relation sol-arbre, *Abies alba*, *Picea abies*.

Summary

Since 2001, forest products can be recognized with a quality label (Appellation d'Origine Contrôlée in France) like food products. Sociological studies suggest the coniferous wood in Jura Mountains (France) have a well-established fame. The first studies about mechanical quality have showed the wood is among the best in Europe. This study has identified ecological parameters determining the wood specificities in Jura Mountains to help industrial actors to define the future delimitation of the AOC with objectives and scientific arguments. This approach is based on previous studies characterizing wine "terroirs" (Vaudour, 2002) and cheese "terroirs" (Monnet, 1996). Climate and soil were the base of environmental parameters. A protocol for mapping forest soils of Jura Mountains has been defined with stratified and hierarchical approach. It is based on the variability of geological compartments and topography ("geo-topographical" units). The study area was divided with four reference areas. This sampling was conducted to describe the diversity and abundance of soil in each geo-topographical units resulting in 13 complex soils units (UCS). The morphological description of soil was conducted to evaluate soil properties, using a synthetic index (CERU). Based on these data, 27 representing stations were selected for their variability in local properties in the Jura to study relationships between ecological properties and tree characteristics. For each station, a detailed soil study is realised (soil description, stoniness, systematic depth map). Trees are measured and located into the station. Dendrometric measurements were completed by ultrasonic measurements of mechanical wood quality. The results showed there is a significant influence of nutrients richness and individual water capacity of soil on wood density. Trees have a higher density if they are located on stations with a elevated pH and with a large soil volume. The geographical distribution of stations has shown that there is no altitude effect. On similar soil conditions, there will be no difference between two stations at different altitudes. The environmental conditions are homogeneous throughout the Jura mountains, despite a variability that may be important at a local scale. This study also confirmed that the pines and spruces of Jura have got high quality wood with a relatively low variability. Part of its context (rainfall, limestone, range of average altitude, slope and brunisols), Jura mountains are originals. For AOC "Bois du Jura delimitation, these data provide new information on soil and bedrocks properties and spatial soil-tree relationships.

Keywords : AOC, wood quality, soil mapping, scaling, soil-tree relationships, *Abies alba*, *Picea abies*.

Introduction générale

La notion de terroir se définit comme l'ensemble des interactions complexes entre climat, sol, matériel végétal et savoir-faire (*Vaudour, 2003*). Le terroir est rattaché à des concepts tels que la qualité et la typicité, il se décompose en quatre sous-ensembles : agrocultural, territorial, publicitaire et identitaire. De nombreux travaux se sont intéressés aux terroirs viticoles et fromagers (*Morlat, 1989 ; Vaudour, 2003 ; Monnet, 1996*).

Les produits communément éligibles à une Appellation d'Origine Contrôlée, auprès de l'institut national des appellations d'origine (INAO, inao.gouv.fr), sont des produits agro-alimentaires (vins, spiritueux, fromages...). Cependant, depuis 2001, la loi d'orientation forestière a permis d'étendre au secteur forêt-bois le régime des appellations d'origine applicable aux produits agricoles.

En 2003, l'Association suisse pour l'AOC "bois du Jura" (porteur de projet, côté suisse) a vu le jour, suivie en 2004, de l'Association de défense et de promotion des bois du Jura A.O.C. (porteur de projet, côté français).

Les études de notoriété des bois résineux du massif du Jura ont montré que cette notoriété historique est bien établie, aussi bien auprès du grand public que chez les industriels (*Martin, 2003 ; Sauget, 2004*). Les premières études sur leur résistance mécanique les classent parmi les meilleurs bois d'Europe (*Concepts Bois Structure, 2004*).

En 2004, un dossier de demande de reconnaissance en AOC a été déposé par les deux porteurs du projet suisses et français (aocboisdujura.fr ; aocboisdujura.ch), auprès de l'office fédéral de l'agriculture (Berne, Suisse) et de l'institut national des appellations d'origine (Paris, France). Un cahier des charges a été mis au point afin de définir les exigences attendues pour les bois du massif. La production globale de sapins et d'épicéas est principalement située entre 800 et 1200 m d'altitude (60 %). Cependant, il existe une différence entre les deux côtés de la frontière. Pour le Jura français, les zones de production et de transformation sont confondues. Pour le Jura suisse, la zone de production, très étroite, est dissociée de la zone de transformation dont les scieries sont implantées à la périphérie du massif. La particularité de cette production réside dans la préconisation d'une régénération naturelle qui devient obligatoire à partir de 1100 m. Dans le cas de l'utilisation de semis artificiels, les matériels de reproduction doivent être issus des peuplements locaux.

L'UMR Chrono-Environnement a été sollicité afin d'apporter des arguments scientifiques objectifs sur le massif du Jura (état des lieux des conditions environnementales, originalité du massif, spatialisation des données de qualité). L'étude menée devant être réalisée sur une zone très étendue (environ 5800 km²), elle a demandé la mise en place d'un protocole adapté se basant sur un changement d'échelle de la station vers l'échelle globale en appréhendant la variabilité des paramètres environnementaux en lien avec une production de bois résineux de qualité.

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1. Introduction.

Les propriétés mécaniques de qualité du bois résineux jurassien reconnues sont la conséquence de la combinaison de paramètres environnementaux qui font l'originalité du massif du Jura. La littérature a été consultée afin de réaliser un état des lieux des connaissances sur les différentes composantes et de leurs relations.

Premièrement, la notion de « terroir » et d'Appellation d'Origine Controlée (AOC) seront résumées. Les démarches antérieures de caractérisation des terroirs seront présentées en décrivant les différents paramètres utilisés pour les décrire.

Ensuite, la cartographie des sols sera détaillée. Ce tour d'horizon bibliographique couvrira les différentes étapes d'élaboration d'une carte, de la méthode d'échantillonnage à la spatialisation des sols.

Pour terminer, l'étude de la qualité du bois sera présentée en détaillant les facteurs (environnementaux, anthropiques...) qui sont en lien avec la densité du bois. Une importance particulière sera attachée à faire un état des lieux des études stationnelles mettent en relation les paramètres environnementaux avec la qualité du bois de résineux.

2. Terroir – AOC.

La définition d'une AOC pour les produits sylvicoles constitue un champ nouveau. Les démarches antérieures dans le domaine sylvicole ou fromager permettent d'apporter des éléments méthodologiques utiles à cette caractérisation.

Le « terroir » est la combinaison originale des caractéristiques climatiques, géologiques, pédologiques et biologiques d'un territoire, révélées par un savoir-faire local.

2.1. Les bois jurassiens.

Les études de Martin (2003) et de Sauget (2004) ont constitué un état des lieux préliminaire au lancement du projet « AOC » et la définition d'une aire pour les bois résineux du massif du Jura.

D'après Martin (2003), la notoriété des bois du Jura est ancienne et dépasse largement les limites du massif. Les bois les plus cités, lors de l'enquête auprès des professionnels de la filière bois, sont le sapin et l'épicéa. Ces deux espèces sont associées à la montagne et à une bonne qualité de bois. Elles sont principalement utilisées en construction (charpente). Il s'agit d'un bois faisant preuve d'une forte identité originale (typicité), conséquence du climat et du relief jurassien qui entraîneraient une croissance lente et de bonnes propriétés mécaniques. La reconnaissance en AOC pourrait permettre de valoriser la production sylvicole du massif. D'après Sauget (2004), les scieries sont

principalement de type familial et leur approvisionnement en matière première se fait essentiellement dans le massif du Jura. Les caractéristiques géographiques (altitude), climatiques (tempéré humide à tendance continentale) et pédologiques (bons sols forestiers) sont déterminantes dans la qualité des bois. La demande de reconnaissance en AOC pourra être faite d'après la combinaison de ces paramètres.

La caractérisation d'un terroir sylvicole étant une démarche nouvelle et originale, il est nécessaire de s'intéresser aux démarches antérieures de définitions d'AOC sur des produits différents (vins, fromages, etc...).

2.2. Les terroirs viticoles.

Les terroirs viticoles constituent la principale source des études sur les terroirs.

D'après Maby (2003), les paysages viticoles présentent un enjeu important car ils renvoient à des références socio-culturelles fortes et peuvent modeler l'image d'un produit, et en conditionner la notoriété. Les aires d'AOC doivent témoigner de la qualité et de la préservation du patrimoine. Le paysage viticole est un outil de qualification des produits du terroir et un instrument de communication. Toutefois, le concept de terroir ne se réduit pas à son aspect social. En effet, Van Leeuwen et Seguin (2006) ont montré que le « terroir » est un concept important en viticulture puisqu'il représente les conditions environnementales auxquelles le raisin est soumis.

A la suite de Morlat (1989), Vaudour (2003) a fait un point très complet sur les études traitant des terroirs viticoles. Pour cet auteur, le terroir se rattache à des concepts tels que la qualité et la typicité. La qualité est définie par trois composantes que sont le milieu naturel, l'émulation positive et le milieu social. La qualité est liée au terroir par l'évocation géographique en lien avec la notoriété et/ou les propriétés agronomiques du produit. La typicité correspond à la qualité particulière d'un produit alimentaire. Elle est spécifique à un lieu de production et n'est pas reproductible. Le terroir est vu comme l'ensemble des interactions complexes entre climat, sol, matériel végétal et savoir-faire (Vaudour, 2003).

Des approches méthodologiques des unités « terroirs » ont été entreprises suivant plusieurs approches : climatique, paysager ou encore pédologique. La définition scientifique du terroir se fait selon deux approches : la différenciation géographique du produit et de sa matière première (qualité du produit) ou bien la différenciation des potentialités naturelles du milieu viticole. Les différents échelons d'approche du terroir sont locaux et fonctionnels (écophysiologiques, intégrées...), ou bien suivant des unités de terroir associées aux approches locales (unité terroir de base, unité de terroir viticole, limites des unités locales fonctionnelles). A la connaissance des terroirs pourra succéder une spatialisation : zonage et cartographie. Les objectifs du zonage convergent vers l'amélioration qualitative, environnementale et économique des vignobles. il permet une thématisation des unités et une analyse spatiale en pédo-paysages.

De nombreux vignobles français ont été le sujet d'études de terroir.

Aujourd'hui, le concept de « terroir » et sa définition intéressent les pays étrangers qui développent des études de caractérisation de leurs terroirs viticoles. Carey *et al.* (2002) a cherché à produire une carte d'unités « terroir » où la topographie complexe de la zone proche-atlantique (Afrique du Sud) engendre des environnements nombreux et différents pour la viticulture. Chaque unité étant décrite par un complexe variable, base solide pour

étudier les effets sur la phénologie du vin. Conradie (2002) a développé l'influence du type du sol sur le vin (Durbanville et Robertson, Afrique du Sud). Ce sont la réserve utile du sol, son humidité et les autres facteurs édaphiques qui joueront un rôle significatif sur le vin.

2.3. Autres exemples de terroirs...

Les études de terroir ne se limitent pas à la thématique viticole.

L'étude de Monnet (1996) sur la définition d'un terroir fromager (Comté) a un point commun avec notre étude : le massif du Jura. Les caractéristiques géologiques, géomorphologiques et climatiques ont été inventoriées. Cinq ensembles climatiques homogènes ont été définis pour regrouper les fruitières. Un deuxième mode de regroupement prend en compte les caractéristiques édaphiques dominantes pour individualiser des unités fonctionnelles (Unités Agro-Pédologiques). Le contour des partitions édaphiques et sensorielles se superposent et confirment l'existence des zones de cru (constituant le terroir). Les terroirs ont ainsi été spatialisés.

Blanchard et Burac (2003) ont travaillé sur la révision de la délimitation de l'aire du rhum AOC Martinique. Les problèmes rencontrés lors de la délimitation sont ceux de décider si l'ancienneté historique est appréciée au niveau de la culture de la canne ou lors de la distillation du rhum agricole. Les caractéristiques de l'altitude et du sol sont également prises en compte pour une question de déficit hydrique durant la période de maturation de la canne.

Travers (2004) a réalisé une étude inspirée des travaux réalisés sur la vigne et transposés au terroir cidricole. Cette étude a porté sur l'influence des conditions physiques sur la composition des pommes et sa conséquence sur la qualité et la typicité des produits cidricoles. Les résultats ont montré que les conditions pédo-climatiques modulent la composition des pommes et qu'une telle étude permet d'avoir une meilleure maîtrise de la matière première par une adaptation des pratiques culturales.

2.4. Autres appellations.

Les AOC ne sont pas les seules à bénéficier des études des terroirs. Berard *et al.* (2001) proposaient des outils et des méthodes en vue d'élaborer la délimitation géographique des « indications géographiques protégées » (IGP). Il s'agit de mettre en forme une méthodologie opérationnelle pour délimiter les zones d'IGP. Elle s'appuie sur 6 critères : le savoir-faire, la réalité économique actuelle, la qualité des matières premières, les facteurs écologiques, la réalité historique et l'existence d'un zonage préalable. Les opérateurs économiques et les savoirs-faire actuels sont identifiés. Les facteurs écologiques et la réalité économique sont pris en compte pour délimiter une zone précise. L'origine des matières premières n'intervient que s'il y a une spécificité sur le produit fini.

3. Sols jurassiens - Cartographie pédologique.

3.1. Etudes régionales.

Les études sur les sols franc-comtois ont été nombreuses depuis les travaux de Bruckert, à l'Université de Franche-Comté (Le Tacon, 1976 ; Gaiffe M., 1972, 1991 ; Bruckert et Gaiffe, 1980, 1985, 1990 ; Michalet, 1982 ; Tan, 1983, 1988 ; Blondé, 1989 ; Bruckert, 1989 ; Lucot et Gaiffe, 1994, 1995 ; Monnet JC., 1996). Diverses problématiques ont été

traitées, des sols forestiers aux milieux cultivés.

3.2. Typologie des sols.

Le « centre universitaire d'études régionales » (CUER) (1985) a publié un ouvrage sur la typologie et la diversité des sols de Franche-Comté. Les intérêts de la cartographie a été exposée dans le cadre de l'étude des paysages. Bruckert et Gaiffe (1990) ont mis en évidence le rôle du matériau géologique dans la diversité des sols qui constitue le paysage. Sur les pentes fortes ou sur les surfaces planes présentant des calcaires fragmentés (ou lapiazés), les sols sont calciques ou carbonatés. Le climat général n'a qu'une faible influence sur leur évolution. Par contre, pour les sols sur surface plane ou sur calcaire compact (silicatés ou recouverts de d'apports éoliens), le climat général joue un rôle important dans la décalcification. La pédogenèse est acide et les sols bruns sont très représentés.

Le massif ayant une position trans-frontalière, la connaissance des sols passe par un élargissement des recherches aux études suisses. Oudinot (1984) a étudié et cartographié la typologie des sols du pied du Jura suisse.

3.3. Contexte calcaire et sols caillouteux.

Bruckert et Gaiffe (1980) ont étudié la typologie des sols dont la profondeur était directement en lien avec le type de roche mère en présence (banc calcaire compact, calcaire friable, roche meuble). Au sein du massif jurassien et son contexte calcaire, les sols caillouteux sont fréquemment rencontrés. Blondé (1989) a étudié l'influence de la fissuration des roches sur l'humification, le régime hydrique et l'organisation des sols en milieu calcique. Il a été montré qu'il existe une relation entre le caractère plus ou moins humifère des sols et le degré de fracturation des roches (dans le contexte de l'étude). De plus, les systèmes drainants et hyperdrainants sont caractérisés par leurs flux hydriques intenses. D'après Lucot (1994), qui a étudié la pierrosité des sols forestiers jurassiens, un indice de pierrosité permet la mise en relation de la morphologie du système racinaire des arbres avec les différentes contraintes liées à la présence des éléments grossiers. Lucot et Gaiffe (1994) ont également cartographié les sols de massifs forestiers témoins sur substrats calcaires. Les sols ont été décrits à l'aide du sigle morpho-édaphique défini par Bruckert (1989) en intégrant l'indice de pierrosité. Cet sigle est un outil permettant de décrire les sols de façon synthétique. Il a été développé pour les sols de Franche-Comté.

3.4. Relations sol-résineux.

Des études ont porté sur les relations qu'il existe entre les sols franc-comtois et les résineux. Ces études se sont inspirées de travaux antérieurs sur l'influence du climat, de l'humus et de la sylviculture sur les jeunes résineux et la régénération (Becker, 1970 et 1977 ; Aussenac, 1975 ; Drapier, 1980 et 1983). En outre, Tan (1983) a traité de la régénération du sapin dans le Jura en prenant en compte le rôle du sol et du climat. Les sols décrits sont de type brunifiés. Les résultats ont également montré que la régénération du sapin est limitée par le pH faible de la station (3,7-5,5) mais au-delà, ce sont les cations du sol qui conditionnent la régénération, plus que le pH. Le micro-climat des combes et le couvert forestier ont un effet sur la régénération du sapin. Bonvicini (1983) a également étudié la régénération du sapin à l'étage montagnard du Jura mais en s'intéressant à l'échelle stationnelle. La régénération est optimale sur les sols bruns humifères à pellicule

calcaire en bordure de doline. Le pédo-climat dû au faciès calcaire et les excellentes propriétés physiques du sol sont à l'origine de ce résultat. Aux Etats-Unis (sud-ouest de Washington), Devine et Harrington (2007) ont également étudié le microclimat dans une jeune plantation de résineux (température air et sol). L'exploitation de la plantation entraîne des modifications de la température qui jouent un rôle sur la croissance de l'arbre et le développement de son système racinaire.

3.5. Description et propriétés des sols.

La description des sols et leur typologie ont fait l'objet d'ouvrages complets (*Duchaufour, 1995, 2001*). Pour la classification des sols, les ouvrages les plus régulièrement cités sont ceux de la FAO (1999) pour la classification internationale et Baize et Girard (1995) pour le référentiel pédologique français.

Dans le contexte jurassien, la présence d'éléments grossiers dans le sol est très fréquente et les recherches bibliographiques ont été orientées dans ce sens. Les études, citées dans le point précédent (*Blondé, 1989 ; Lucot, 1990 ; Lucot et Gaiffe, 1994*). Lucot et Gaiffe (1995) ont proposé une méthode de description des sols forestiers caillouteux sur substrat calcaire. Les éléments grossiers ont été classés selon leur forme (plaquette, pyramide, polyèdre) et selon leur taille afin de déterminer le volume occupé dans le sol et la contrainte s'exerçant sur les racines. En forêt, cinq classes de profondeur ont été retenues pour la définition de l'indice de pierrosité (seuils : 15, 30, 60 et 90 cm).

De nombreuses études ou ouvrages traitent du sujet. Gras (1994) a décrit le fonctionnement des sols caillouteux de façon très détaillée. La pierrosité du sol est importante car elle modifie ses propriétés en accentuant des effets ou en les inhibant. La présence d'éléments grossiers dans le sol, peut s'avérer problématique pour le développement du système racinaire des arbres en diminuant le volume de sol prospectable pour les racines en modifiant l'alimentation hydrique et minérale. A ces modifications physiques s'ajoutent les contraintes d'ordre chimique (*Lucot et Gaiffe, 1995*). L'appréciation de cette contrainte peut déboucher sur des mesures indirectes de propriétés des sols. Dupouey *et al.* (1997) ont étudié les variations de la densité des sols en relation avec les caractéristiques physico-chimiques. Les mesures de densité sont problématiques pour les sols caillouteux. Le but est d'arriver à une estimation de la densité sans être obligé de faire des mesures directes en passant par des modèles statistiques. Les modèles ont montré que les variables déterminantes sont la pierrosité, le taux de carbone et la profondeur. Eriksson et Holmgren (1996) ont comparé deux méthodes de mesure du taux d'éléments grossiers dans les sols forestiers par évaluation du potentiel de pénétration de surface. Les méthodes employées, le pénétromètre (tige métallique fine) et les ondes radar, sont considérées comme non-destructrices. Elles ne nécessitent pas d'ouverture du sol, limitant les perturbations. Les résultats montrent que les ondes radar sont les plus précises. Cependant, la méthode du pénétromètre est moins lourde à mettre en place.

La présence et la nature des éléments grossiers du sol sont des paramètres importants de la qualification stationnelle. Stendahl *et al.* (2002), ont montré l'influence de la chimie et de la minéralogie du sol sur la qualité d'une station.

D'autres études ont été menées pour comprendre l'influence que pourrait avoir la pierrosité sur les mouvements d'eau du sol. D'après Zhu et Shao (2006), la présence des

éléments grossiers entraînent des modifications des propriétés physiques des sols et sur les mécanismes d'infiltration de la pluie. Le maximum d'infiltration a lieu pour un taux de cailloux de 10 %. Wang et Shao (2006) ont montré qu'il existe un effet de la taille et de la forme des cailloux sur le taux d'infiltration. Cependant, les données concernant l'humidité des sols caillouteux est rare dans la littérature.

3.6. Méthodes d'échantillonnage – Cartographie.

La réalisation d'une carte de sols doit obéir à des règles précises afin que la couverture pédologique puisse être représentée de la façon la plus fidèle et précise possible.

La géologie est un facteur important dans l'initialisation d'un plan d'échantillonnage et l'ouvrage de Pomerol et Renard (1997), renseigne sur les relations entre le sol et la roche sur lequel il s'est développé.

Les démarches de cartographie des sols sont développées dans l'ouvrage de référence de Legros (1996). Trois grands types d'échantillonnage peuvent être réalisés pour l'élaboration d'une carte pédologique. La cartographie statistique ou géostatistique se base sur un ensemble de données ponctuelles qui peuvent être issues d'études différentes ou d'un échantillonnage aléatoire. L'interpolation ou l'extrapolation spatiales permettent l'élaboration de la carte. La cartographie « par sections » se base sur un maillage systématique qui divise arbitrairement de la zone d'étude en pixels. Enfin, la cartographie raisonnée permet de choisir l'emplacement des sondages. Cette démarche demande une connaissance et une bonne compréhension du milieu. Elle tient compte des éléments paysagers, de l'occupation sol... etc. Gaddas (2001) a mis au point une méthode de cartographie pédologique par une démarche paysagère, interactions de plusieurs facteurs du milieu. Deux types de méthodologie ont été étudiés : une étude des voisinages des unités et un procédé de généralisation cartographique.

4. Traitement statistique – Spatialisation.

Les statistiques et le mode de spatialisation sont des étapes importantes de la cartographie pédologique.

Walter (2002) a détaillé les méthodes d'analyse spatiale des sols. Le but étant de permettre leur gestion précise et leur surveillance. La variabilité des sols étant perçue de façon positive ou négative, les concepts et les enjeux de l'analyse spatiale des sols y sont présentés. La description de l'organisation spatiale des sols est possible qu'après validation des documents cartographiques existants puis par la valorisation de ces données. L'étape suivante est la prédiction ou la modélisation en prenant en compte la variabilité des sols.

4.1. Définition des unités.

Des études plus « conceptuelles » ont permis d'étudier les aléas de la variabilité des sols et pédo-paysages. Legros *et al.* (1996) ont étudié la délimitation d'unités de paysage sur des photos aériennes. Il s'agissait de savoir si un zonage par photo-interprétation des unités de paysage était reproductible grâce au travail indépendant de vingt binômes. Certaines limites naturelles sont bien perçues par l'ensemble des expérimentateurs. Pour le reste, une bonne part de subjectivité conduit à des tracés différents. Brus et Gruijter

(1997) ont posé la question suivante : « échantillonnage aléatoire ou modèle géostatistique pour les sols ? La réponse était que chaque méthode doit tenir compte de la problématique. D'après Ibanez *et al.* (1995) qui ont traité des concepts et des mesures de la pédo-diversité, les indices utilisés en écologie sont utilisables pour la description des sols. Frey et Borouchaki (2002) ont cherché à simplifier les cartes géologiques. La mesure de la déformation locale permet de minimiser les erreurs d'approximation durant la simplification.

D'après la littérature, il existe différentes méthodes pour apprécier la variabilité spatiale des sols. Lagacherie *et al.* (1995 ; 2001) ont étudié la représentativité de la cartographie d'une zone de référence. Cette méthode doit être testée selon la zone d'étude afin d'optimiser la qualité et le nombre des points d'échantillonnage. Il est courant d'utiliser un zonage topo-géologique comme base d'une carte pédologique. Laurent et Rossignol (2003) ont cartographié les propriétés hydriques des sols à partir de la lithologie et des pentes. Cependant, la géologie étant un paramètre important dans ce type de cartographie, il est nécessaire d'en tester les biais. Souvent, la carte géologique aura une échelle différente de celle de la carte des sols, d'où le besoin de redéfinir les unités au préalable. L'échantillonnage par une méthode « linéaire » est employée également. Fritzsche *et al.* (2007) ont choisi d'apprécier la variabilité des sols du rift éthiopien par la méthode du transect. Le long de cet axe, les conditions climatiques et les aspects du paysage entraînent des conditions de formation de sols très différentes.

Une fois que la carte a été dressée, il est nécessaire d'en tester les limites en terme de contenu et délimitation des unités pédologiques. King et Saby (2001) ont ainsi analysé la représentativité des cartes pédologiques de France, au 1/100000. Dans ce cas, les 24 cartes publiées constituent un échantillon assez bien représentatif du territoire. Tous les types de sols décrits par la FAO-UE y sont présents. Legros (1996) a également proposé des tests de qualité pour une carte des sols. La validité du prézonage est confirmée si les limites majeures sont tracées afin de mettre en évidence les discontinuités et d'isoler des plages où le contenu présente une certaine spécificité. Lors du contrôle de précision des limites, un degré d'incertitude de la position de ces limites est consentie en fonction de l'échelle, sur le terrain (exemple : 200 m pour 1/50000) et sur la carte (4 mm). Pour terminer, le contenu des unités peut être validé par un retour sur le terrain et la vérification avec de nouveaux sondages permettant le calcul de la pureté de l'unité.

4.2. Changements d'échelle.

Lors des changements d'échelle, l'appréciation de la variabilité spatiale des sols peut également être mise en évidence. D'après Phillips (2001), lorsque l'on teste l'évolution de la résolution et la structure spatiale, la variabilité du pédo-paysage est largement influencée par l'échelle d'étude. Carré (2002) a montré l'importance des variations d'échelle lors de l'élaboration de cartes pédologiques. Deux méthodes de cartogénèse ont été utilisées, cartogénèse classique et cartogénèse issue d'une base de données. Les résultats ont montré que les modèles cartographiques établis peuvent aboutir à une modification de l'échelle finale, conséquence de la variation des facteurs. Les géostatistiques (régression-krigeage) ont été employées pour établir les règles de distribution de chaque sol. Smith *et al.* (2006) ont étudié les effets de la résolution d'un modèle numérique de terrain (MNT) sur l'étude des sols. Il a été montré que la résolution, du MNT, la plus fine, n'est pas obligatoirement synonyme d'un résultat cartographique avec une précision d'information optimale. Il en est de même pour Garten *et al.* (2007) qui

ont testé la variabilité des propriétés des sols à différentes échelles dans un écosystème forestier. Les résultats ont montré une augmentation de la variabilité avec l'augmentation de l'échelle. D'après Ryan *et al.* (2000), les effets du changement d'échelle des paramètres intégrés des sols forestiers et leur prédiction spatiale peuvent être décrits par des outils classiques et le traitement du MNT, c'est à dire en utilisant les relations qu'il existe entre les paramètres environnementaux et la répartition spatiale des sols.

4.3. Traitement statistique et modélisation.

Le traitement statistique et la modélisation sont des outils très couramment employés pour la cartographie des sols.

Curt et Marsteau (1997) ont étudié la production forestière à travers les systèmes géo-pédologiques. Les analyses multivariées ont été réalisées à l'aide d'analyse factorielle des correspondances et de classification ascendante hiérarchique afin de différencier les unités géo-pédologiques distinctes.

D'après Thomas *et al.* (1999), la prédiction des types de sols peut être réalisable grâce au traitement des paramètres géologiques et topographiques sur une zone de référence (représentative). Les relations entre propriétés des sols, la nature de la roche et l'intensité de la pente sont utilisées pour extrapoler à large échelle. La comparaison, des pixels occupés par chaque classe de sols, avec une carte 1/100000, montre que le modèle reproduit 55% de la carte. Les différences viendraient des dépôts superficiels non mentionnés. Lagacherie et Voltz (2000) ont également étudié la prédiction des propriétés des sols cartographiées suivant une zone de référence et un modèle d'élévation. La classification des sols est utilisée en même temps que le krigeage.

La modélisation spatiale des sols peut être mise en œuvre dans de nombreuses thématiques. Le Bissonnais *et al.* (2004) ont traité de la modélisation et de la cartographie des risques d'érosion des sols à l'échelle régionale. Un modèle a été mis au point sur un système d'information géographique, regroupant les différents paramètres liés aux sols et à la topographie. Les résultats de ce modèle ont permis de proposer un outil de gestion pour la protection des sols et de l'environnement. Laurent et Rossignol (2004) ont étudié la sensibilité d'un modèle agro-hydrologique à la cartographie des sols. L'intérêt de l'indice topographique a été mis en évidence pour l'identification des variables comme l'hydromorphie. Lagacherie *et al.* (2000) ont utilisé l'approche spatiale sur les données de sols imprécises pour la modélisation.

D'après Claessens *et al.* (2005), lorsque l'on étudie l'effet de la résolution des modèles numériques de terrain sur la modélisation spatiale des sols, il n'existe pas de résolution « parfaite », chaque contexte doit être pris en compte. Hupy *et al.* (2004) ont également étudié la complexité des paysages en fonction de l'échelle de carte.

Le krigeage est une méthode géostatistique largement employée dans l'analyse spatiale des sols : description, prédiction, modélisation et variabilité (Carré et Girard, 2002 ; Hengl *et al.*, 2004 ; Girard *et al.*, 2005). Cependant, l'analyse spatiale entraîne obligatoirement des incertitudes qu'il faut prendre en compte dans la prédiction de contenu et/ou de limite des unités cartographiques. Pour cela, Lark et Bolam (1997) ont étudié les incertitudes dans la prédiction et l'interprétation de la spatialisation des variables des sols. Précédemment, Lathrop *et al.* (1995) ont choisi d'étudier l'impact de la variabilité spatiale

des cartes digitales des sols sur la modélisation de l'écosystème. Les bases de données régionales de sols peuvent être employées dans la modélisation lorsqu'elles sont accompagnées de la quantification de la variabilité attendue.

4.4. Outils numériques – Télédétection.

D'après Dobos *et al.* (2000), il est possible d'associer un MNT et des données satellitales pour répondre à une problématique de cartographie des sols. En 2001, Dobos *et al.* ont réalisé une cartographie pédologique régionale à travers l'utilisation de l'AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) et d'un MNT. Il s'agissait de comparer les résultats avec des données prises sur le terrain (mais elles s'avèrent insuffisantes pour la classification des sols...). Le MNT est un outil important pour la caractérisation des relations sol-paysage. Areola (2002) a utilisé la photo-interprétation pour cartographier les sols. Les photos aériennes ont permis d'extrapoler les propriétés des sols. Puis, la validité des données a été testée par des méthodes statistiques.

La spatialisation des sols et leur représentation cartographique font appel dans la majorité des cas à des systèmes d'information géographiques (SIG). Loukili *et al.* (2000) ont mis en œuvre une approche géo-morpho-pédologique qui a été couplée à un SIG pour la gestion des sols. Cette démarche permet de réaliser des analyses spatiales sur les paramètres édaphiques des sols. Mendonca Santo *et al.* (2000) ont utilisé la cartographie SIG en 3-Dimension pour l'étude de la variabilité spatiale d'horizons pédologiques.

La télédétection permet de mettre en évidence les différences de régime hydrique des parcelles forestières et spatialiser les données. Couplée aux systèmes d'information géographiques, l'analyse d'images est couramment utilisée dans l'étude des formations végétales. Brunelle *et al.* (1989) ont traité de l'intérêt de la télédétection pour la cartographie des milieux forestiers. Cet outil permet la cartographie et l'étude des peuplements forestiers sur des superficies importantes ainsi qu'une perception dynamique des données. Tran (2000) a utilisé la méthode de la télédétection hyperspectrale pour cartographier les formations végétales du marais de Kaw (Guyane française).

La télédétection a également été utilisée pour l'étude des résineux. Büttler et Schlaepfer (2004) ont étudié le dépérissement des épicéas grâce aux systèmes d'information géographique et les photographies infra-rouges, tout comme Gong *et al.* (1997) qui ont étudié la reconnaissance de résineux grâce à une analyse hyperspectrale. Friedli *et al.* (1998) ont combiné les méthodes classiques d'étude des sols avec les photos aériennes dans le proche infra-rouge et les photos « radar ». Cette méthode permet d'élargir les études *in situ* à de larges zones grâce au traitement des images aériennes.

Au-delà de la localisation ou l'identification, la télédétection peut aussi être un bon outil pour l'étude de fonctionnement de l'écosystème forestier. En effet, Vidal *et al.* (1987) ont couplé la télédétection et le bilan hydrique en utilisant l'infra-rouge et un modèle agro-météorologique. Cette approche a permis l'étude de la variabilité spatiale de la réserve utile du sol et d'estimer les apports par irrigation sur une zone homogène.

Pour terminer, Martinez (2000) a réalisé une étude de télédétection qui se veut généralisable et fidèle à la réalité du terrain. La biomasse forestière et la caractérisation de la structure verticale des peuplements de conifères a été traitée par analyse d'images radars.

Dans le cas du massif du Jura, cet outil ne permet pas d'appréhender directement les propriétés mécaniques des bois. Il serait donc nécessaire de proposer des interprétations indirectes à partir d'autres paramètres décelables par un traitement d'images.

4.5. Exemples d'applications.

La spatialisation des sols est utilisée pour des applications diverses.

Korkalainen et Lauren (2006) ont étudié la productivité d'une station forestière par la méthode SIG. Quinze variables ont été retenues : variables géographiques, topographiques, climatiques et pédologiques. Les variables les plus significatives sont la température, la latitude et la longueur de la saison de végétation. La pente et l'altitude ont également leur importance dans la répartition des sols par les contraintes qu'elles peuvent entraîner.

Agbenin et Tiessen (1995) ont étudié les variations des propriétés des sols sur deux versants. Les variations sont dues aux changements de la roche. Les propriétés varient de façon différente et l'intensité de la pente joue un rôle très important.

D'après Knoepp *et al.* (2000), les indices de la qualité du sol d'une station permettent de mettre en relation les interactions au sein de l'écosystème et de s'assurer de la productivité et du bon fonctionnement du sol en question. Il a été montré que la qualité d'un site peut évoluer en fonction de son exploitation (choix de l'espèce et type de sylviculture).

Pour Tessier *et al.* (1996) qui ont étudié la variabilité spatiale de la qualité chimique et physique des sols de France, il existe une grande diversité compte tenu de la variabilité importante, géologique et climatique. Badeau *et al.* (1999) ont présenté les résultats du premier inventaire systématique des propriétés des sols forestiers en France. Les sols forestiers diffèrent peu des autres sols sur le plan pédo-génétique. La fréquence des sols bruns, des sols lessivés hydromorphes, des sols hydromorphes et des sols podzolisés est plus importante que celle des autres types de sols (sols lessivés non-hydromorphes, sols alluviaux). Les sols forestiers se distinguent très nettement par leur acidité, une forte teneur en carbone et un C/N élevé.

Van Lynden et Mantel (2001) ont montré le rôle du SIG et de la télédétection dans l'étude des risques et la dégradation du sol.

Payn *et al.* (1999) ont utilisé les systèmes d'information géographique et l'analyse spatiale dans le suivi des variations de la production et de la nutrition d'une forêt.

5. Forêt : typologie et paramètres fonctionnels.

Berger et Peyron (2005) ont publié un article sur les valeurs de la forêt française. Les points abordés sont les produits « bois » ou « menus forestiers » (champignons, chasse...etc), mais également la séquestration du carbone, les activités créatives et la biodiversité. La forêt franc-comtoise a été traitée sous son aspect sociologique et historique par Gresser *et al.* (1990). La Franche-Comté est une des régions les plus boisées de France. Les forêts sont une composante importante du paysage de la région. Les conditions de climat, de topographie et de sols ont pour conséquence une grande

diversité forestière. La forêt comtoise a subi des évolutions au cours de son histoire avec des fonctions qui ont suivi les besoins des hommes. Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, une mutation s'est opérée vers une production améliorée.

De nombreuses publications techniques ont été produites pour caractériser les stations forestières par leur peuplement, et les paramètres écologiques qui leurs sont liés. Buffet et Girault (1989) a publié des « éléments méthodologiques sur les stations forestières à travers la production et la qualité des bois ». Cet ouvrage aborde les relations entre le milieu et la production, l'indice de fertilité. La potentialité des stations est également abordée. La qualité du bois est étudiée sous forme de propositions méthodologiques sur la relation station-qualité, en prenant en compte la morphologie des arbres. Le programme « REseau National de suivi à long terme des ECOsystèmes FORestiers (*Dobremez et al.*, 1997) a permis de publier des résultats concernant les « caractéristiques pédologiques de 102 peuplements » et l'« inventaire et interprétation de la composition floristique de 101 peuplements ». Ce programme permet d'étudier le fonctionnement des écosystèmes forestiers à une échelle stationnelle sur le long terme afin de mettre en évidence des modifications éventuelles conséquence des changements des facteurs environnementaux. Beaufils (2001) a étudié la typologie des stations forestières des Pentes Intermédiaires et du deuxième plateau du Jura. Il s'agit d'un inventaire des stations contenant les conditions édaphiques, le peuplement et la valeur patrimoniale. La Société Forestière de Franche-Comté a publié cinq fascicules synthétiques concernant les stations forestières de Franche-Comté (*SFFC*, 1997 ; 2001a ; 2001b ; 2002 ; 2003). Les différents habitats et stations forestières y sont répertoriées. Cet état des lieux permet aux acteurs de terrain (propriétaires forestiers, techniciens gestionnaires) d'identifier les paramètres stationnels et de choisir les essences les mieux adaptées. Pour terminer, la « Clé de détermination des stations forestières du Canton : du Jura et du Jura Bernois » traite des stations forestières du Jura en les répertoriant avec leurs caractéristiques telles que la géologie, le sol, le peuplement, la production et la valeur (*Burnand et al.*, 1998).

Le bilan hydrique des forêts a été le sujet d'études. Bergh *et al.* (1999) ont étudié les effets de la disponibilité de l'eau et des nutriments sur la productivité de l'épicéa. Cette étude a cherché l'optimisation du rendement avec un apport de nutriment et une irrigation des plants. Quentin *et al.* (2001) ont étudié le bilan hydrique des sols d'une forêt lorraine. La teneur en eau au point de flétrissement n'est pas reliée à la texture ni à la nature des constituants minéraux. Les densités apparentes du sol sont corrélées avec la teneur en eau.

6. Dendro-écologie - Qualité du bois.

La littérature qui traite de la qualité des bois (principalement résineux) a été recensée. Il s'agit des méthodes de mesure de la densité du bois, les relations avec l'environnement (climat, sol ...) et l'effet de la gestion des peuplements.

6.1. Mesures de qualité du bois.

Les études de la qualité du bois se sont basées sur les règles physiques afin de trouver les relations qu'il existait entre la vitesse des sons et les propriétés mécaniques du bois. L'intérêt de ces recherches est double puisqu'en plus de connaître les propriétés mécaniques, il est nécessaire de proposer des méthodes non-destructrices du matériau mesuré.

Sandoz *et al.* (2000) ont présenté l'intérêt de l'utilisation des ultrasons dans la mesure de la qualité du bois. Adjanohoun *et al.* (1999) ont également décrit les méthodes de mesure de la densité du bois par les rayons X et les ultrasons. Sandoz (1993) a étudié l'influence de la température et de l'humidité dans les mesures ultrasoniques. Il existe une forte relation entre ces paramètres et les ultrasons. Bachle et Walker (2006) ont également étudié l'influence de la température sur la vitesse du son dans le bois. Les variations de la vitesse évoluent dans le même sens que la température. En 1996, Sandoz a présenté des exemples de l'application des mesures ultrasoniques des bois. Les mesures non-destructrices peuvent être employées de l'arbre sur pied jusqu'à la fin de la transformation.

6.2. Dendrométrie et croissance.

D'après Zhang *et al.* (1999), la densité du bois est liée faiblement et négativement à la croissance de l'épicéa (variation en fonction du génotype et de l'environnement). Il existe également de différences légères entre les familles. Pour Chauhan et Walker (2006), la vélocité acoustique (densité élevée) est supérieure dans les vieux arbres et ceux qui présentent un gros diamètre (avec une variabilité importante).

6.3. Structure du bois.

D'après Mäkinen *et al.* (2007), chez l'épicéa, la croissance radiale de l'arbre est la conséquence de la structure du bois et des trachéides.

En 2007, Bütler *et al.* ont utilisé un appareil à ultrasons (*Sylvatest Duo*®) afin de mesurer la densité du bois dans le cadre de l'étude de la décomposition des troncs d'épicéas suisses. Il a été montré que la vitesse des ondes dans le bois est proportionnelle à la densité mais inversement proportionnelle au taux de carbone du sol. Il s'agit d'un outil performant pour l'étude de la décomposition du bois. Les résultats ont montré que la décomposition fait décroître la densité à l'inverse de l'humidité.

Le bureau d'étude « Concepts Bois Structure » (2004) a effectué des mesures qualitatives par ultrasons en vue de la caractérisation de la valeur mécanique des résineux de Franche-Comté. Les résultats ont montré que deux tiers des arbres présentent des bois de haute performance d'après le système de norme européen (*Eurocode*, classe C30 et supérieures). La différence significative entre sapin et épicéa est peu importante lorsque l'on considère la valorisation de ces deux bois puisqu'ils entrent dans la même classe *Eurocode*. Il n'y a pas de lien entre diamètre et qualité mécanique. Cependant, une légère influence de l'altitude (augmentation des propriétés mécaniques) a été relevée. La qualité (mesures longitudinale) varie selon la place dans la grume (la bille de pied étant la meilleure).

6.4. Propriétés stationnelles.

L'étude des facteurs environnementaux stationnels et globaux est un point primordial dans la compréhension de la variabilité des données de densité du bois.

Le dépérissement et la baisse de croissance radiale ont été mis en évidence chez l'épicéa commun (*Picea abies* L.) à la suite d'un déficit hydrique (Badot et Garrec, 1990 ; Badot *et al.*, 1990). Une grande variabilité individuelle, liée à l'état sanitaire de l'arbre, a été mise en évidence à l'échelle d'un peuplement. Bert (1988, 1992) a réalisé des études dendro-

écologiques sur le sapin (*Abies alba*) du Jura. Sur les stations en exposition chaude les sapins ont des pertes en feuillage plus importantes et un diamètre d'accroissement plus faible. La réserve en eau de la station est liée à la profondeur du sol et à la pente de la station. L'influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution a été étudiée. Les unités phyto-sociologiques s'individualisent par la combinaison de l'altitude et du bilan hydrique (qui dépend de la position topographique, de la pente et du drainage). Les stations les plus fertiles produisent un bois plus dense. Entre 950 et 1300 m, la qualité du bois est conditionnée surtout par l'altitude (plutôt que la fertilité de la station). Ces résultats sont confirmés par Okland *et al.* (2003) qui ont également montré l'influence des conditions environnementales sur les plantations d'épicéas. La combinaison des facteurs durant la croissance de la plantation détermine son impact. Les potentialités forestières pour l'épicéa commun ont été étudiées par Seynave *et al.* (2004). Un ensemble de facteurs a été identifié : climat, eau du sol, niveau trophique. Il existe un fort effet de l'affleurement rocheux (surtout en substrat calcaire qui discrimine les stations (pH, C/N)). Pour terminer, Raiskila *et al.* (2006) ont montré le parallèle entre le taux d'accroissement et les propriétés du bois de clones d'épicéas provenant de différents sites. L'influence de la nutrition, du sol, et du climat sur les variations des propriétés a été mise en évidence, notamment sur la qualité. Cette étude montre clairement un effet important des paramètres environnementaux.

Des études stationnelles ont été menées sur des espèces différentes du sapin et de l'épicéa.

Corona *et al.* (1998) ont étudié les relations entre les facteurs environnementaux et une plantation de pin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*). L'influence des facteurs climatiques (température et précipitations), topographiques (altitude, exposition, pente) et pédologiques (pH, texture...) a été mise en évidence. Les facteurs climatiques déterminent le bilan hydrique qui est le plus important pour la production par rapport à la topographie et au sol. Sanchez-Rodriguez *et al.* (2002) ont montré l'influence des facteurs édaphiques et de la nutrition sur la productivité du pin de Monterey (*Pinus radiata*). La profondeur du sol et la disponibilité des nutriments sont les facteurs les plus influents sur la nutrition et la croissance. L'idéal est de planter sur des sols de profondeur supérieure à 60 centimètres.

Marcos *et al.* (2007) ont étudié la structure des communautés et les propriétés des sols dans une forêt naturelle et plusieurs plantations de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), d'âge différent. La forêt naturelle est composée d'arbres présents depuis plus de 1700 ans et sa variabilité spatiale est le résultat d'usages historiques irréguliers. Le diamètre moyen des troncs est supérieur pour la forêt « naturelle » (le coefficient de variation des variables est également supérieur). Le pH mesuré dans la forêt « naturelle » est plus bas et le taux de matière organique est important. Les résultats ont montré qu'il n'existe pas de différence de mesures entre les plantations de 40 et 80 ans. Deux groupes se distinguent, les deux plantations les plus récentes et le stade mature (proche de celui de la forêt « naturelle »). Des changements sur l'écosystème ont été observés après replantation, par comparaison avec un milieu non perturbé. Des plantations d'âges différents ont été étudiées. Il n'existe pas de différence pour les surfaces des plantations, mais les forêts « naturelles » se différencient par rapport à ces dernières. Il existe une grande variabilité dans le peuplement naturel car de nombreux âges sont représentés. Pour une forêt « naturelle », le pH est plus bas et le taux de matière organique est plus important. Cependant, les jeunes plantations présentent une quantité importante en potassium.

L'échelle stationnelle est abordée par Guilley *et al.* (2004) qui ont mis en évidence l'influence de la qualité stationnelle (fertilité du sol caractérisée par la disponibilité des nutriments et sa capacité en eau), de la sylviculture et de la région sur la densité du bois de chêne sessile (*Quercus petraea*). Les résultats de Bergès *et al.* (2008) vont dans le même sens. L'étude a porté sur les effets des facteurs écologiques sur la croissance radiale et la qualité du bois de chêne sessile (*Quercus petraea*). Les facteurs écologiques ont un effet (léger) sur la densité qui est indépendante de la largeur. Il n'y a pas de corrélation entre la largeur de la section et la moyenne de densité en raison des effets opposés des facteurs liés à l'eau sur le bois final (proportion et densité). Les résultats ont montré que le climat influence la densité du bois. De plus, ces études montrent qu'il n'y a pas d'effet direct de la fertilité sur la densité du bois. L'influence se fait au niveau de la croissance de l'arbre. Il a été montré que l'effet de l'altitude, de la disponibilité en eau et la nutrition sont significatifs mais des différences de qualité ont été observés.

6.5. Climat.

Le climat est un paramètre important qui influence le développement et la qualité du bois. Il conditionne la durée de la saison de végétation et l'alimentation hydrique (par les précipitations). Ce paramètre a un effet plus important que celui de la sylviculture (Cutter *et al.*, 1991).

Lucot (1996) a étudié les rôles du climat et de la concurrence sur la croissance radiale des espèces tempérées. La croissance radiale est principalement influencée par les températures moyennes mensuelles, les précipitations mensuelles totales et le bilan hydrique sur la période de végétation. Il en est de même pour les précipitations automnales (reconstitution des réserves du sol). La concurrence est occasionnée par la sylviculture (position des arbres, contact et accès à la lumière).

Desplanque *et al.* (1998) ont étudié la dendro-écologie des sapins et des épicéas sous l'influence du climat. L'étude a porté sur des peuplements à trois altitudes différentes et sur les deux expositions. La croissance du sapin est favorisée lorsque les précipitations sont abondantes l'été précédant. Elle l'est également pour les étés chauds pour les arbres d'altitude, plantés en exposition nord. L'opposition est plus marquée que pour l'épicéa. Il y a une différence inter-spécifique d'après l'utilisation plus efficace de l'eau du sol par le sapin, thermophile. L'épicéa est plus sensible à la sécheresse estivale.

Park et Spiecker (2005) ont étudié les variations de la structure des cernes de l'épicéa pour des climats contrastés. Les variations à long-terme des paramètres cellulaires sont non-linéaires et similaires entre les différents sites. Les arbres des climats chaud-secs ont des cellules de bois final plus nombreuses alors que pour les climats froid-humides, ce sont les cellules de bois initiales qui sont plus nombreuses. Les différences observées sont des adaptations aux conditions hydriques des différents sites.

Tuovinen (2005) a étudié l'influence des températures et des précipitations sur la croissance radiale du Pin Sylvestre. La densité du bois final, l'épaisseur du cerne annuel et du bois initial répondent plus fortement au climat que la largeur du bois final ou la densité du bois initial. L'épaisseur du bois initial est contrôlé par les précipitations de juin et les températures de décembre-janvier et de mars. Une faible température moyenne en avril, de bonnes précipitations en mai et une chaleur importante en juillet permet d'obtenir de larges cernes. Une période de végétation longue et chaude entraînent la production d'un bois final à forte densité (les relations les plus importantes sont notées pour les

températures et les précipitations de juillet et août.

D'après Andreassen *et al.* (2006), les différents paramètres météorologiques (surtout durant la saison de végétation) sont corrélés au diamètre, donc à la croissance de l'épicéa. La météo de juin semble être prépondérante. Deux types de réponses opposées ont été mises en évidence. La croissance est limitée par les précipitations de juin en plaine. Cependant, c'est la température de juin qui conditionne une croissance limitée pour les altitudes les plus élevées.

Kern et Popa (2007) ont étudié les relations climat-croissance dans diverses plantations de résineux. Une corrélation positive a été mise en évidence avec le climat du début de la saison de végétation mais également les températures du début juillet, de janvier et de l'automne ainsi que les précipitations d'avril. Il est noté une corrélation négative avec les températures d'avril.

Des études ont également été menées à la suite d'événements climatiques extrêmes.

Pichler et Oberhuber (2007) ont étudié la croissance radiale des conifères dans les Alpes après la canicule de 2003. La croissance radiale a été fortement réduite en 2003. Généralement, les précipitations de avril à juin sont le facteur le plus fortement lié à la croissance. L'impact des climats extrêmes sur la croissance radiale varie selon le site, la position dans la canopée et des réponses spécifiques aux facteurs climatiques.

Les effets du climat seront accentués par la sylviculture. Manetti et Cutini (2006) ont étudié la croissance des cernes de sapin dans deux plantations ayant des modes de sylviculture différents. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de corrélation avec les précipitations alors qu'il y a une corrélation significative de la croissance entre les températures de février, avril et août. L'effet de la sylviculture augmente simplement les facteurs de risque (facteurs écologiques, stress climatiques, pollution de l'air). De plus, Badot *et al.* (1988) ont montré que le dépérissement de l'épicéa commun est la conséquence d'un déficit hydrique et des dépôts acides liés aux facteurs climatiques.

6.6. Sol.

Le compartiment « sol » joue également un rôle important sur le développement des arbres. Il sert d'assise et de réserve pour l'alimentation en minéraux et en eau.

Le Tacon (1976) a montré que la présence de carbonate de calcium dans le sol provoque des difficultés de croissance chez de nombreuses espèces de résineux forestières. L'épicéa est une essence sensible à la présence de calcaire. La présence de calcaire dès la surface entraîne une baisse de la production sauf en cas de bonnes conditions d'alimentation en eau. Le pH du sol calcaire ne dépend pas de la teneur en calcaire total ou actif mais de la teneur en matière organique. L'augmentation du pH du milieu est négatif pour la croissance. Curt *et al.* (1996) ont étudié l'alimentation hydrique forestière compte-tenu de son importance sur la production sylvicole. Des méthodes de diagnostic sont développées avec une mesure de la réserve utile, l'estimation des apports et des départs. L'indice de fertilité (ensemble de variables décrivant le milieu) est intégré pour estimer la production. Le bilan en eau permet d'expliquer la variation de l'indice de fertilité. Curt *et al.* (2001) ont étudié le système racinaire du douglas (*Pseudotsuga menziesii*) en relation avec le sol. La biomasse de racines fines est maximale dans les sols n'ayant pas de contraintes majeures. La répartition verticale des racines est positivement corrélée

avec le carbone organique et l'azote total. Il existe des corrélations négatives avec le faciès de la roche et l'aluminium échangeable.

Des recherches bibliographiques ont été effectuées sur l'existence ou non, de l'influence du calcium du sol dans la structure des fibres du bois. Existerait-il une augmentation de la densité du bois en présence de calcaire ? La littérature ne contient aucune information exploitable à ce sujet.

6.7. Gestion forestière et sylviculture.

Les interventions de l'Homme dans la gestion des forêts présentent une importance indéniable dans la modification de l'environnement stationnel d'un peuplement. Les études traitant de la gestion sylvicole ont abordé les effets de la densité des arbres et le cas des éclaircissements du peuplement sur la croissance et la densité du bois.

Misson *et al.* (2003b) ont traité des réponses de la croissance radiale en fonction de la l'intensité des éclaircissements dans les plantations d'épicéas. Les résultats montrent qu'à court, moyen et long terme, la croissance radiale est largement diminuée par un éclaircissement important. Pour une faible intensité, la croissance radiale peut augmenter durant les 15 premiers jours. Il a été montré que la densité altère les relations climat-croissance. A l'échelle individuelle, l'éclaircissement peut être une méthode pour augmenter la résistance au stress hydrique (cet effet est limité par les paramètres du milieu). Misson *et al.* (2003a) ont étudié les effets de la sylviculture (intensité de l'éclaircissement) sur la réponse de l'épicéa à la sécheresse. Dans les stations humides, la croissance radiale présente une réponse tardive par rapport aux variations du climat. Pour les stations sèches, la croissance radiale est immédiatement influencée par la disponibilité de l'eau au début de la saison de végétation. La réduction de la densité de peuplement altère directement les relations entre climat et croissance radiale. A court terme, l'éclaircissement augmente la conservation de la croissance radiale et les processus physiologiques en lien avec le stress hydrique. L'effet est plus marqué sur les stations humides. Alteyrac (2005) a étudié l'influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés mécaniques du bois d'épinette noire : les arbres ont été débités en billes pour subir une batterie de mesures de qualité de bois. Les paramètres anatomiques, physiques et mécaniques ont été relevés et montrent une très grande variation de la vitesse radiale de la moelle vers l'écorce (traduisant la transition, bois jeune-bois mature). Les variations concernent également la hauteur de l'arbre et non la densité du peuplement. Les variations sont accentuées dans le bois juvénile. Il a également été constaté que la densité du peuplement a un effet plus important sur la croissance plutôt que sur la masse volumique du bois. Il a également été montré que la proportion de bois juvénile augmente avec la densité du peuplement. Il y a une grande influence de l'angle des micro-fibrilles et de la masse volumique des cernes sur les propriétés mécaniques des bois. Par contre, la largeur des cernes n'a pas d'influence sur ces propriétés. Jaakkola *et al.* (2006) ont montré que les densités du bois ne sont pas significativement différentes pour des traitements de fertilisation et d'éclaircissement différents. Cependant, l'accroissement de diamètre est significatif. D'après Plauborg (2004), la disponibilité de l'eau influence significativement la croissance radiale en lien avec la densité des plantations. Les différentes espèces ne réagissent pas de la même manière pour l'augmentation de leur croissance radiale quand la densité diminue. Pour l'épicéa, la réponse est forte.

Des études ont été menées sur l'influence des origines et de la variabilité de provenance des arbres sur la densité du bois.

Court-Picon *et al.* (2004) ont étudié l'adaptabilité et la variabilité des origines des pins pignon au travers de leur dendrométrie. Maghuly *et al.* (2006) ont abordé la diversité génétique des populations « cultivées » d'épicéas. Il existe plus de variabilité intra-populationnelle qu'inter-populationnelle. Les populations des altitudes les plus élevées montrent plus de variabilité que celles des altitudes basses et moyennes. Williams *et al.* (2007) ont étudié la diversité génétique et la structure spatiale des résineux en environnement rocailleux. A court terme, la fragmentation et les perturbations n'affectent pas la structure génétique de la population. Blouin *et al.* (1994) ont étudié la qualité du bois d'épicéa poussant en plantation. Il a été noté, une faible corrélation entre la croissance et la densité. Il n'y a pas de différence significative entre les provenances. Ces résultats confirment le potentiel d'une croissance rapide et une excellente densité lorsque les propriétés du sols et les conditions climatiques sont adaptées.

La gestion forestière cherche à tenir compte de la compétition entre les arbres afin de tirer le meilleur parti en terme de production.

Picard et Bar-Hen (2002) ont étudié la corrélation spatiale (négative) entre la surface terrière des arbres et leur accroissement afin de savoir s'il s'agit d'un bon indicateur de la compétition. Dans la forêt, les gros arbres sont répartis de façon régulière alors que les petits sont répartis de façon agrégée. La question posée est la suivante : sans compétition, cette modification de configuration (en fonction du diamètre) lié à la taille serait-il possible ? La dynamique du peuplement entraîne une ambiguïté dans certains cas. La répartition spatiale peut être la conséquence d'une évolution temporelle marquée par la compétition.

6.8. Dendro-écologie.

Les études dendro-écologiques ont majoritairement traité de reconstitution à une échelle de temps très large (Guiot, 1984 ; Rathgeber et Roche, 2003 ; Martinelli, 2004 ; Copenheaver et Abrams, 2003 ; Rubino et McCarthy, 2004). Perret *et al.* (2006) ont réalisé une étude dendro-géo-morphologique décrivant l'activité spatio-temporelle des éboulis. Gartner *et al.* (2002) ont publié une revue bibliographique sur les indices en dendrochronologie pour les études de structure et de fonction du bois d'un aspect plus structurel. Les interprétations dendrochronologiques reposent sur l'existence des relations entre la plante et l'environnement. Les études fonctionnelles et structurelles sur le bois pourraient permettre de clarifier ces relations. Les études descriptives traitent des échelles de temps courtes ou longues afin d'apporter des informations phénotypiques, génotypiques, populationnelles et évolutives. Les études mécaniques montrent la cause des résultats mais il reste de nombreuses lacunes à combler. Il est nécessaire de mettre au point de nouvelles techniques permettant une évaluation rapide de la structure de la plante. Il est impératif de persévérer dans le sens des associations trans-diciplinaires afin de comprendre les processus en balayant un large champ scientifique.

Les relations structure/environnement ne sont plus à démontrer. Zhang *et al.* (1999) ont réalisé une étude dendro-écologique sur des résineux en tenant compte de la croissance, du climat et des ravageurs. La croissance radiale est sensible aux précipitations du printemps et les températures du début de l'été. En altitude, les fortes températures d'été

auront un effet négatif. Puhe (2003) a publié une revue bibliographique sur la croissance et le développement du système racinaire de l'épicéa dans les plantations forestières. Plusieurs points y sont développés comme les caractéristiques principales de la croissance racinaire (physique et chimie du sol) ou la phénologie. L'épicéa commun peut se développer sur une large gamme de sols aux conditions physiques et chimiques variées avec une préférence pour les sols riches en matière organique. L'acidité du sol et la toxicité de l'aluminium sont un frein significatif à la croissance des racines. Le mode de gestion sylvicole a également rôle important sur son développement.

7. Conclusion.

La littérature ne présente pas d'études traitant d'appellation d'origine contrôlée sur les bois. Les terroirs sylvicoles n'ont également pas été étudiés.

Cependant, l'influence des facteurs climatiques (température et précipitations), topographiques (altitude, exposition, pente) et pédologiques (pH, texture, capacité en eau et éléments minéraux) a été mise en évidence dans de nombreuses études.

Il a été montré que le climat joue un rôle important dans le développement et la qualité du bois. Il conditionne la durée de la saison de végétation et l'alimentation hydrique, par les précipitations. Ce paramètre a un effet plus important que celui de la sylviculture. La croissance radiale est principalement influencée par les températures moyennes mensuelles, les précipitations mensuelles totales et le bilan hydrique sur la période de végétation. Les précipitations automnales permettent la reconstitution des réserves du sol. Dans les stations humides, la croissance radiale présente une réponse tardive par rapport aux variations du climat. Pour les stations sèches, la croissance radiale est immédiatement influencée par la disponibilité de l'eau au début de la saison de végétation. Cependant, dans les stations en exposition chaude les sapins ont des pertes en feuillage plus importantes et un diamètre d'accroissement plus faible. La croissance du sapin est favorisée lorsque les précipitations sont abondantes l'été précédant. Elle l'est également pour les étés chauds pour les arbres d'altitude, plantés en exposition nord. Il existe une différence inter-spécifique car l'épicéa est plus sensible à la sécheresse estivale. Structuellement, l'épaisseur du bois initial est contrôlé par les précipitations de juin et les températures de décembre-janvier et de mars. Une faible température moyenne en avril, de bonnes précipitations en mai et une chaleur importante en juillet permet d'obtenir de larges cernes. Une période de végétation longue et chaude entraînent la production d'un bois final à forte densité (les relations les plus importantes sont notées pour les températures et les précipitations de juillet et août). C'est la température de juin qui conditionne une croissance limitée pour les altitudes les plus élevées. Il est important de tenir compte du microclimat stationnel.

L'alimentation hydrique et minérale sont des paramètres clé de la productivité. Il a été montré que la disponibilité de l'eau influence significativement la croissance radiale en lien avec la densité des plantations. Les différentes espèces ne réagissent pas de la même manière pour l'augmentation de leur croissance radiale quand la densité diminue. Pour l'épicéa, la réponse est forte. La profondeur du sol et la disponibilité des nutriments sont les facteurs les plus influents sur la nutrition et la croissance. Les stations les plus fertiles produisent un bois plus dense. Le dépérissement et baisse de croissance radiale ont été mis en évidence chez l'épicéa commun (*Picea abies* L.) à la suite d'un déficit hydrique.

Le rôle du sol sur les arbres est un thème récurrent dans la littérature. L'alimentation hydrique et minérale est fortement liée au type du sol. La biomasse de racines fines est maximale dans les sols n'ayant pas de contraintes majeures. La répartition verticale des racines est positivement corrélée avec le carbone organique et l'azote total. Il existe des corrélations négatives avec le faciès de la roche et l'aluminium échangeable. La pierrosité entraîne une diminution du volume propectable qui se traduit par une contrainte pour le développement racinaire. De plus, la présence de carbonate de calcium dans le sol provoque des difficultés de croissance chez de nombreuses espèces de résineux forestières. L'épicéa est une essence sensible à la présence de calcaire. La présence de calcaire dès la surface entraîne une baisse de la production sauf en cas de bonnes conditions d'alimentation en eau. Le pH du sol calcaire ne dépend pas de la teneur en calcaire total ou actif mais de la teneur en matière organique. L'augmentation du pH du milieu est négatif pour la croissance. La littérature ne contient aucune information exploitable sur le rôle du calcium du sol sur la densité du bois.

Il a été montré que les effets du climat sont accentués par la sylviculture. Cette dernière augmente simplement les facteurs de risque (facteurs écologiques, stress climatiques, pollution de l'air). De plus, elle peut être à l'origine de la concurrence entre les individus (position des arbres, contact et accès à la lumière). A court, moyen et long terme, la croissance radiale est largement diminuée par un éclaircissement important. Pour une faible intensité, la croissance radiale peut augmenter durant les 15 premiers jours. Il a été montré que la densité altère les relations climat-croissance. A l'échelle individuelle, l'éclaircissement peut être une méthode pour augmenter la résistance au stress hydrique (cet effet est limité par les paramètres du milieu). Les densités du bois ne sont pas significativement différentes pour des traitements de fertilisation et d'éclaircissement différents. Cependant, l'accroissement de diamètre est significatif.

Les mesures de vitesse acoustique (densité élevée) est supérieure dans les vieux arbres et ceux qui présentent un gros diamètre (avec une variabilité importante). Chez l'épicéa, la croissance radiale de l'arbre est la conséquence de la structure du bois et des trachéides. De plus, il a été montré que la vitesse des ondes dans le bois est proportionnelle à la densité mais inversement proportionnelle au taux de carbone du sol. Une étude a montré que les valeurs mécaniques des résineux de Franche-Comté sont situées pour les deux tiers dans les catégories de bois de haute performance d'après le système de norme européen (*Eurocode*, classe C30 et supérieures). De plus, il n'y a pas de lien entre le diamètre et la qualité mécanique. Il existe une très grande variation de la vitesse radiale de la moelle vers l'écorce (traduisant la transition, bois jeune-bois mature). Les variations concernent également la hauteur de l'arbre et non la densité du peuplement. Les variations sont accentuées dans le bois juvénile. Il a également été constaté que la densité du peuplement a un effet plus important sur la croissance plutôt que sur la masse volumique du bois. Il a également été montré que la proportion de bois juvénile augmente avec la densité du peuplement. Il y a une grande influence de l'angle des micro-fibrilles et de la masse volumique des cernes sur les propriétés mécaniques des bois. Par contre, la largeur des cernes n'a pas d'influence sur ces propriétés.

La démarche adaptée à cette problématique se doit d'être pluridisciplinaire et multi-échelles. La caractérisation d'un terroir s'apparente à une caractérisation des propriétés écologiques dans un but d'aménagement et de gestion d'un produit défini et reconnu.

Chapitre 2 : Caractéristiques écologiques et organisation du massif du Jura - Sélection de zones de référence

1. Introduction.

Ce chapitre a pour but d'exposer la démarche scientifique générale qui sera suivie dans cette étude.

Ce travail a pour objectif, la définition des ensembles écologiques afin d'expliquer les relations entre les facteurs écologiques et certaines caractéristiques des peuplements de sapins et d'épicéas dans le massif du Jura. Cette caractérisation se rapproche de la définition d'un terroir.

Le terroir se rattache à des concepts tels que la qualité et la typicité (*Morlat, 1989 ; Vaudour, 2003*). Sa délimitation est basée sur la délimitation d'unités écologiques homogènes. Les caractéristiques géologiques, géomorphologiques et climatiques doivent être inventoriées afin d'établir les unités fonctionnelles (*Monnet, 1996*).

La démarche suivie dans cette étude se rapprochent de celles qui sont développées pour la caractérisation des terroirs.

La distribution des sols peut être prédite après traitement des données géologiques et topographiques sur une zone de référence représentative d'une zone plus étendue (*Lagacherie et al., 1995, 2001 ; Thomas et al., 1999 ; Lagacherie et Voltz, 2000*). Les relations entre d'une part les propriétés des sols et d'autre part les unités géologiques et topographiques (modèles d'organisation) sont ensuite utilisées pour extrapoler à large échelle.

Dans un premier temps, les caractéristiques de la zone d'étude (géologie, climat, topographie, sol) et celles des espèces étudiées (biologie, écologie, stations forestières, gestion) seront définies et en particulier les informations cartographiques.

Le massif représentant une surface d'étude relativement vaste, il a été choisi de définir des zones de références, au nombre de quatre, où les différents paramètres écologiques ont été étudiés avec précision en vue d'un changement d'échelle et l'extrapolation au massif jurassien dans son ensemble.

Les objectifs de ce chapitre sont doubles. Il s'agit de réaliser un état des lieux des méthodes employées dans les études antérieures mais également de réaliser un inventaire des informations concernant le massif jurassien et les données cartographiques disponibles. Une fois ces opérations réunies et analysées, il sera procédé au choix des secteurs de référence.

2. Zone d'étude – Le massif du Jura.

2.1. Géo-morphologie.

(*Chauve, 1975 ; Fierz et Montbaron, 1999*)

Le massif du Jura est situé à l'est de la France, de part et d'autre de la frontière franco-suisse (*Figure 2.1*). Il s'étend sur environ 250 km de long pour 65 km de large, avec une convexité tournée vers le nord-ouest.

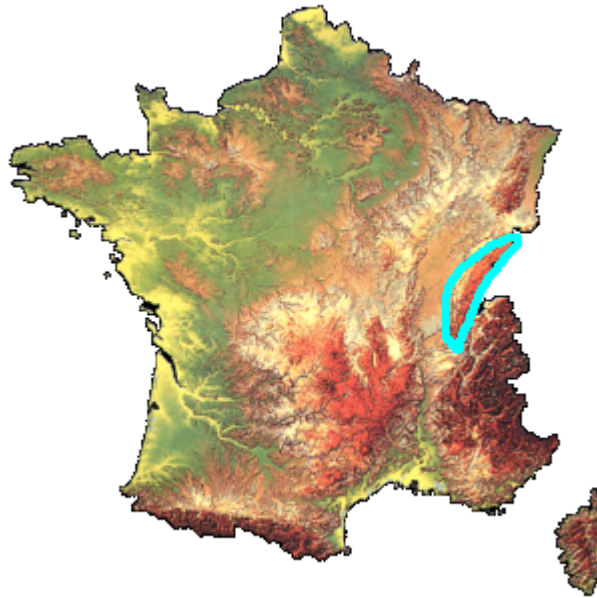


Figure 2.1. Situation du massif du Jura en France métropolitaine.

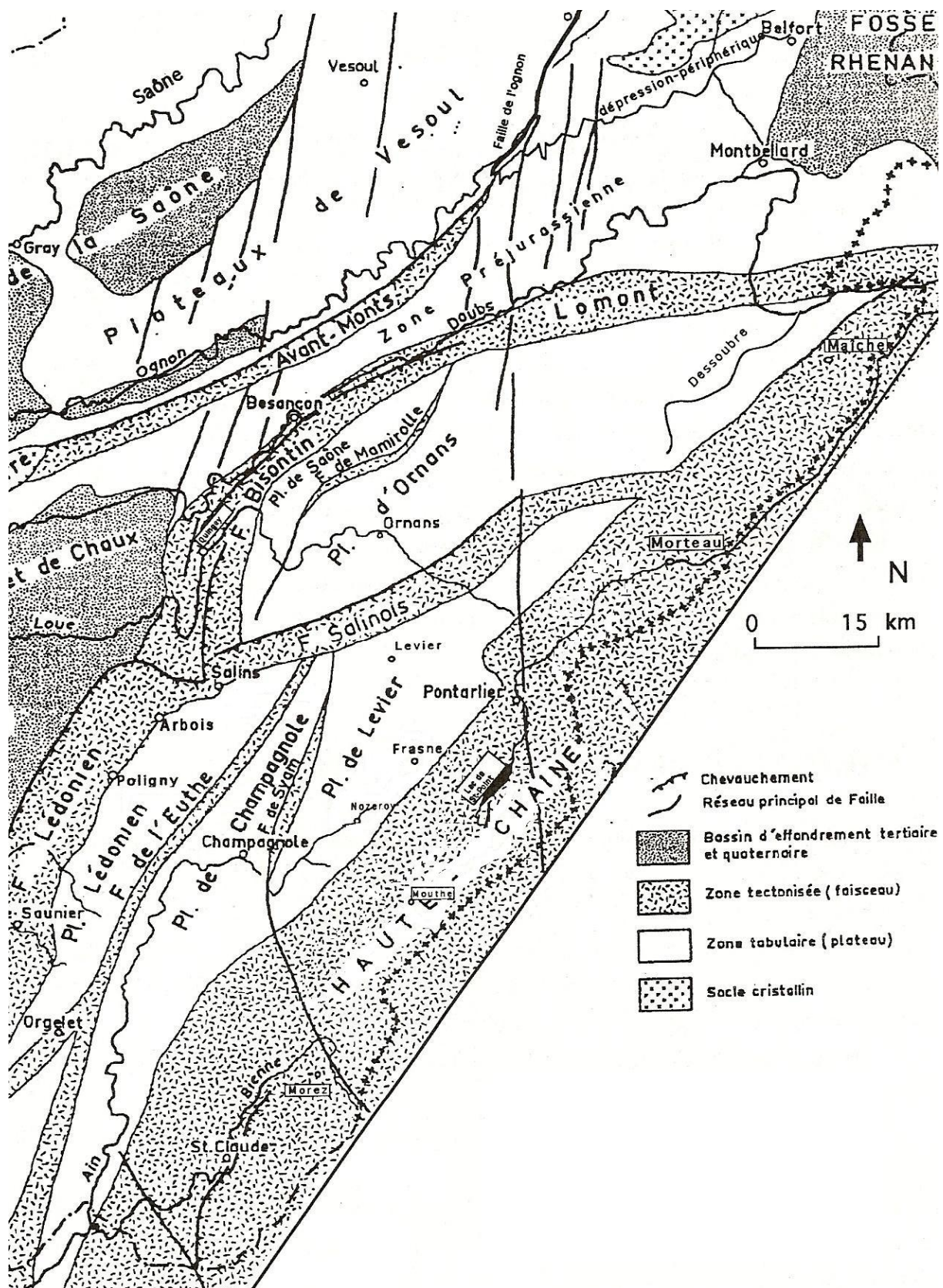
Le massif du Jura est bordé par le bassin d'effondrement bressan à l'ouest ; par la vallée de l'Isère, au sud ; par la plaine mollassique suisse à l'ouest et par les plateaux de la Haute-Saône, au nord-est. Sur sa partie septentrionale le massif s'appuie sur les massifs anciens des Vosges et de la Forêt Noire (séparées par le fossé d'effondrement « rhénan ») (*Figure 2.2*).

Le Jura est une chaîne jeune dont la surrection est inhérente à l'orogénèse alpine. Il se compose de trois grands secteurs correspondant à l'élévation de l'altitude, du nord-ouest au sud-ouest : les premiers et deuxièmes plateaux, et la Haute-Chaîne. Le gradient altitudinal s'étend de 400 m à 1723 m (Crêt de la Neige, *Figure 2.3*).

Le « Jura externe » est constitué d'un domaine sub-tabulaire peu déformé (plateaux), séparé par des faisceaux (secteurs étroits et plissés, *Figure 2.2*). Les plis serrés dans le Jura septentrional s'élargissent dans la partie centrale (jusqu'à 25 km) pour donner de larges anticlinaux et synclinaux souvent replissés. Dans le Jura méridional, les plateaux disparaissent et les faisceaux externes sont directement en contact avec la Haute-Chaîne.

Les premiers plateaux du Jura, d'altitude faible (400-700 m) sont séparés par le faisceau salinois (orienté nord-est sud-ouest). Au nord, le plateau de Saône est séparé du plateau d'Ornans par la faille de Mamirolle. Au sud, le plateau lédonien est séparé du plateau de de Champagnole par la Chaîne de l'Euthe.

Les deuxièmes plateaux sont limités à l'ouest par la Chaîne de l'Euthe et au Nord par le faisceau salinois. Ils s'étendent jusqu'à la Haute-Chaîne. Les plateaux ayant la plus grande surface sont les plateaux de Levier et de Champagnole, prolongé au sud par le faisceau d'Orgelet.



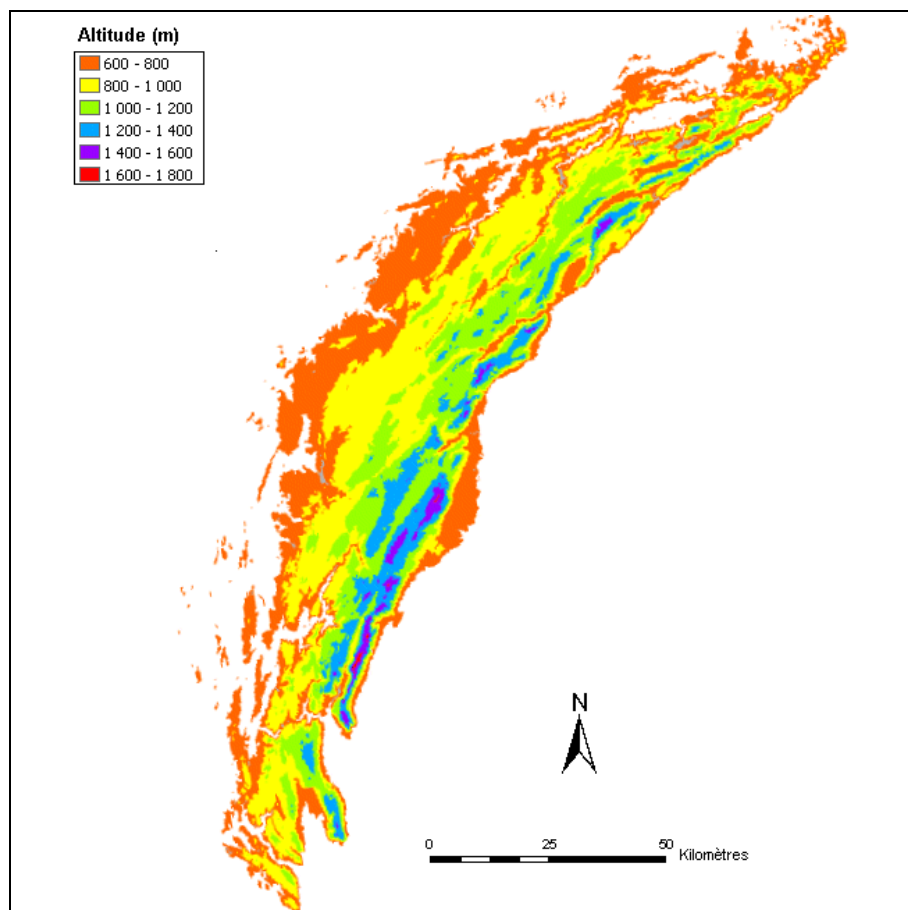


Figure 2.3. Classes d'altitude du Massif du Jura.

Le « Jura interne » est constitué d'une zone très plissée : la Haute-Chaîne (altitude supérieure à 1000 mètres) (Figure 2.2). Le faisceau helvétique est le plus large et il est composé de plis parallèles qui s'étendent du Nord au Sud du massif. Ces plis présentent une disparité de forme nord-sud. Ils sont resserrés dans la partie septentrionale et ils s'élargissent dans la partie méridionale pour former de synclinaux et dans anticlinaux étendus qui peuvent être replissés.

La morphologie du massif est marqué par des orientations nord-nord-ouest et ouest ainsi que sud-est et est (Girault et al., 2000 et 2001). Ces orientations conditionnent l'intensité du rayonnement reçu au sol. Cependant, l'échelle présentée montre que la contribution des pentes est faible par rapport à la problématique sauf pour les pentes les plus marquées. La pluviométrie du massif est suffisamment abondante pour que la différence d'évapotranspiration ne soit pas différente entre les deux versants.

La variabilité de conditions de formation et d'origine géologiques est la cause d'une grande diversité de faciès des roches calcaires.

2.1.1. Histoire du massif Jurassien.

(Chauve, 1975 ; Rosenthal, 1985 ; Havliceck et Gobat, 1996 ; Fierz et Montbaron, 1999)

Les roches jurassiennes ont pour origine la sédimentation de formations carbonatées de l'époque jurassique et crétacée. Il s'agit d'une succession de séries transgressives et régressives d'intensité différente (sédimentation détritque, néritique ou lagunaire). Les

dépôts de calcaires sont de composition variable donc ils présentent des résistances différentes à l'altération.

Au Jurassique inférieur, une mer épi-continentale peu profonde et peu agitée est présente. Au Jurassique moyen, la sédimentation est bio-détritique (maximale au Bajocien) et décroît pour aboutir à des calcaires marneux (Callovien).

Au Jurassique supérieur, des marnes (Oxfordien) et des calcaires tendres argileux (Argovien) puis des calcaires micritiques (Kimméridgien et Portlandien) se développent jusqu'au Purbeckien.

Au Crétacé inférieur, une nouvelle sédimentation se met en place avec des marnes (Valanginien et Hauterivien) et calcaires micritiques (Barrémien). Les dépôts sont plus importants sur la Haute-Chaîne.

Au Crétacé supérieur, un changement des modalités de sédimentation s'opère, permettant des dépôts sableux et gréseux.

Les cycles orogénétiques tertiaires ont permis l'individualisation du massif : la majorité de la zone est émergée pendant le Cénozoïque.

Au début, le relief est faible avec une faible pente générale dirigée vers le sud-est. Durant l'Oligocène, d'importantes déformations des couches (plis et failles) s'opèrent, surtout sur la Haute-Chaîne. Durant la transition Miocène-Pliocène, une puissante orogénèse permet l'émergence de la chaîne jurassienne. Suite à la surrection alpine, la couche sédimentaire se décolle du socle hercynien et les roches orientales épaisses se plissent et se fracturent en entraînant la formation de la Haute-Chaîne, qui prend son orientation nord-est. Ainsi, les Jura tabulaires et plissés se sont individualisés et le relief typique en escalier se met en place : du nord-est au sud-est de larges plateaux en gradins se succèdent, séparés par des faisceaux étroits. Les Plateaux sont formés de couches sub-horizontales légèrement inclinées vers l'intérieur de la Chaîne.

Au tertiaire, une longue période d'altération et d'érosion s'opère sur le Jura (Miocène), principalement sur la partie externe (plus élevée). La Haute-Chaîne subit une succession de transgressions et régressions (recouvrement de dépôts molassiques par une mer peu profonde et peu agitée). Le Jura externe émergé subit l'érosion (climat subtropical humide) et la dissolution des masses de calcaires qui libèrent des chailles, des silex (Argovien) et des argiles de décarbonatation (Jurassique supérieur). Les couches les plus dures du Jurassique moyen se dégagent.

L'émersion de la Haute-Chaîne entraîne l'ébauche du réseau karstique actuel par fracturation intense du socle calcaire et l'inversion du relief.

Au quaternaire, les variations climatiques sont très marquées. Dès le Pléistocène, des glaciations se succèdent. L'avant-dernière glaciation (Riss) laisse des traces (moraines externes) jusqu'au rebord occidental du massif. Au Pléistocène supérieur, la dernière glaciation (Würm) laisse des traces plus visibles (dépôts morainiques importants). Les périodes tardiglaciaires d'érosion et les longues périodes interglaciaires remanient la couverture morainique et laisse des traces discontinues. Des dépôts limoneux éoliens plus ou moins épais recouvrent localement les roches calcaires mais ils se généralisent sur l'ensemble du massif. Leur composition minérale se différencie des calcaires sur lesquels ils reposent. Ils ont un rôle important dans l'orientation de la pédogenèse en fonction de l'épaisseur du dépôt. Les sols qui se développeront sont brunifiés avec un pH inférieur à 6.

2.1.2. Inventaire des étages géologique des massifs forestiers.

(Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1957, 1963, 1965a, 1965b, 1967, 1969, 1970a, 1970b, 1972a, 1972b, 1973, 1975, 1976, 1979, 1982, 1983, 1985, 1988a, 1988b, 1990, 1993, 1997, 2004, 2006, 2008a, 2008b)

Le Jura est constitué d'un grand ensemble calcaire avec des intercalations marneuses (*Tableau 2.1*). Cependant, la nature et le faciès des roches calcaires sont variables (calcaires compacts, graveleux, crayeux ...etc). La structure est principalement sous forme de bancs de taille variable. Le calcaire peut être oolithique, lithographique ou à entroques. Les roches présentent une quantité d'impuretés plus ou moins importantes, les calcaires-marneux sont représentés de façon régulière. Des particularités ont été relevées comme la présence de silex, de chailles, de grès... etc.

L'importance de la nature de la roche dans la formation du sol n'est plus à démontrer. Compte-tenu de la diversité géologique du massif, la pédogenèse sera tributaire du degré d'altération de la roche. Ainsi, pour un étage donné, les sols pourront se former tantôt sur un banc calcaire massif, tantôt sur un calcaire-marneux tendre.

La présence de dépôts éoliens n'est pas à négliger (*Havlicek et Gobat, 1996*). En effet, ces dépôts se retrouvent sur la quasi-totalité de la surface du massif du Jura. Cependant, leur répartition spatiale n'a pas été étudiée dans son ensemble même si dans la littérature, leur présence est régulièrement citée ou discutée.

L'épaisseur des dépôts varie considérablement. Dans les zones d'accumulation, les couches peuvent être épaisses (plusieurs mètres) et recouvrent la roche calcaire. Leur localisation est principalement relevée dans les zones de plateaux ou de pentes douces. Les dépôts les plus marqués se font en fond de vallon et de doline.

L'épaisseur va fortement conditionner l'orientation de la pédogenèse sur calcaire (influence directe sur l'intensité de la brunification et/ou de la carbonatation). La nature et la fissuration de la roche sous-jacente va conditionner en partie la présence et l'abondance de ces dépôts éoliens.

2.2. Climat.

(Mathieu, 1976 ; Mathieu, 1978 ; Bourgeois et Mathieu, 1979 ; Richard et Hainard, 1981 ; Rameau et Richard, 1990 ; Rameau, 1991 ; meteofrance.com)

Le climat jurassien est de type continental avec des influences océaniques : en général, les automnes sont beaux, les hivers rigoureux, les printemps tardifs et changeants, et les étés lourds et orageux. Le massif jurassien est à la fois sous influence océanique et continentale, d'où la présence d'un vent dominant (27,5 %) sud-ouest, sud-sud-ouest (« le vent »), venant de l'Atlantique et apportant la pluie. L'arrivée de vent secondaire (13 %) vient du nord-est (« la bise »), apportant le gel et la neige. Dans ce contexte continental, l'influence océanique est prépondérante puisque le massif agit comme une première barrière perpendiculaire aux perturbations océaniques.

Les précipitations mesurées sont abondantes (fréquence et quantité, supérieures à 1200 mm.an⁻¹). Toutefois, les variations inter-annuelles sont très importantes. La pluviosité est répartie tout au long de l'année et présente deux maximum au printemps et en automne. Elles sont largement supérieures à l'évapo-transpiration potentielle. L'augmentation de l'altitude correspond à l'augmentation des précipitations (hausse de 170 mm par 100 m).

Les isohyètes se calquent assez fidèlement sur les accidents majeurs de la topographie. Le massif se trouve au-dessus de l'isohyète 1100 mm qui coupe la Franche-Comté en deux. L'isohyète 1200 mm se trouve à la limite occidentale des seconds plateaux (Vercel, Pierrefontaine, Maîche). Les reliefs les plus marqués, du nord de la région, se trouvent au-delà de 1400 mm. Les vallées encaissées du Dessoubre et du Doubs sont plus abritées. Au sud de l'axe Salins-Pontarlier, le relief s'accroît et la pluviométrie également. Il existe une différence Nord-Sud en terme de pluviométrie, l'abondance de précipitations sur les reliefs du sud est plus importante que celle des massifs du Nord de même altitude.

Les précipitations les plus abondantes ont lieu en automne (novembre et décembre), en fin de printemps (juin) et durant l'été (août). Les mois de juillet, septembre et janvier n'apparaissent arrosés que très localement. En altitude (plateaux et Haute-Chaîne), deux des trois mois les plus arrosés, le sont durant la saison froide.

Deux mois plus secs se trouvent en hiver et en début de printemps. Dans le massif du Jura, le mois de juillet est le plus sec. Cependant, le déficit hydrique est rapidement compensé par le mois d'août, très arrosé.

Etages	Type	Etages	Type	Etages	Type
Fx Alluvion andenne de haut niveau.	A	j0 Aalénien supérieur.	C	j1a Bajocien moyen et inférieur – Aalénien supérieur.	C
Fy Alluvions anciennes.	A	j1 Bajocien.	C	j2 Bathonien.	C
Fyz Alluvions quaternaires indifférenciées.	A	j1a - b Bajocien inférieur et moyen.	C	j2 - 3 Callovien – Bathonien supérieur – Bathonien.	C
Fz Alluvions récentes.	A	j1a - r Bajocien inférieur.	C	j3 Callovien inférieur.	C
Fz2 Alluvions modernes.	A	j1aP Bajocien.	C	j3a Callovien inférieur.	C
Fz1T Alluvions tourbeuses.	A	j1b Bajocien moyen et supérieur.	C	i6 - 5 Aalénien – Thoardien.	C
LP Limons des plateaux, loess, lehm s.	A	j1c Bajocien supérieur.	C	i9b - j1b Aalénien supérieur – Bajocien inférieur et moyen.	C
AC Colluvions.	E	j2a Bathonien inférieur.	C	j5 Argovien.	C
E Colluvions.	E	j2a Bathonien inférieur.	C	j5 - 7 Oxfordien supérieur – Tithonien indifférencié.	C
E Eboulis.	E	j2b Bajocien supérieur – Bathonien supérieur – Callovien.	C	j5a - c Oxfordien inférieur à supérieur.	C
Ez Eboulis tardiglaciaires.	E	j5A Oxfordien moyen – Argovien.	C	j5b Oxfordien supérieur.	C
Kz et Ky Glissements.	E	j5M Argovien mixte.	C	j5e Oxfordien supérieur.	C
R Formation résiduelle sur calcaire.	E	j6 Oxfordien supérieur – Rauracien.	C	j6a Kimméridgien inférieur et supérieur – Oxfordien supérieur.	C
S Dépôts de gélifraction (ou géliflution).	E	j6b Oxfordien supérieur.	C	j7 Kimméridgien inférieur – Séquanien – Tithonien.	C
Fgya Alluvion andenne de bas niveau.	G	j7 - 6 Séquanien – Rauracien.	C	j8 Kimméridgien.	C
G Alluvions glaciaires indifférenciées.	G	j7 - 8a Kimméridgien inférieur et supérieur – Séquanien.	C	j9 - 8 Portlandien – Kimméridgien supérieur.	C
Gy2 Alluvions glacio-lacustres.	G	j7b Séquanien supérieur.	C	j9P Purbeckien.	C
Gm Alluvions glaciaires morainiques.	G	j7c Séquanien supérieur.	C	jP Portlandien – Purbeckien.	C
Gxj Complexe morainique wurmien indifférencié.	G	j7c - d Kimméridgien inférieur.	C	n1 - 2 Valanginien.	C
Gy Dépôts glaciaires et fluvioglaciaires.	G	j8a Kimméridgien inférieur et supérieur.	C	n3 Hauteriviens.	C
Gy2 Moraines non sub-divisées.	G	j8b Kimméridgien supérieur.	C	j4 Oxfordien – Oxfordien inférieur – Callovien moyen et supérieur.	C
Gya Moraines.	G	j8P Kimméridgien supérieur.	C	j4 - 5 Oxfordien supérieur – Oxfordien inférieur.	C
Gyc Moraines caillouteuses.	G	j8R Kimméridgien.	C	j5 - 4 Argovien – Oxfordien.	C
Uy Tufs postwurmiens.	G	j9 Tithonien – Portlandien – Kimméridgien supérieur.	C	j7a Séquanien inférieur – Kimméridgien inférieur.	C
m Miocène.	G	lj Aalénien.	C	i4 Charmouthien.	C
m1b - 2a Helvétien – Burdigalien.	Imog	n2 Valanginien.	C	i5 - 4 Toarden – Charmouthien.	C
m2 Burdigalien	Imog	n4 Barrémien.	C	i6 Aalénien.	C
n5 Aptien.	Imog	n4 - 5 Barrémien – Aptien.	C	i7 - 8 Toarden – Aalénien inférieur.	C
	Imog	n4 - 5U Barrémien – Aptien.	C	n3a Hauteriviens inférieur.	C
	Imog	nU Hauteriviens supérieur – Barrémien inférieur – Bédoulien.	C		

Calcaire massif, en bancs
Indifférencié marnes + calcaires
Marnes

Tableau 2.1. Regroupement des étages géologiques en classe de type de faciès.

En altitude, une partie des précipitations se fait sous forme de neige. Les jours d'enneigement et de gel sont nombreux à partir de l'étage sub-montagnard.

La température moyenne annuelle est comprise entre 10 et 12°C. La température est influencée par quatre paramètres : l'altitude, la latitude, la longitude et le relief. L'accroissement de l'altitude entraîne une amplitude thermique entre les altitudes hautes et basses surtout en été (abaissment de 0,54°C par 100 m d'altitude). La latitude explique les différences thermiques entre nord et sud, surtout en hiver. Le relief influence l'originalité thermique de certaines vallées (par exemple, la vallée du Dessoubre).

Les températures hivernales sont rudes, la Franche-Comté est coupée en deux ensembles thermiques par l'isotherme 0°C. L'altitude en est la cause principale (450 m pour le nord, 600 m pour le sud) et le relief module les formes des isothermes.

En été, l'isotherme 17°C sépare les montagnes des plateaux. Les écarts de températures sont plus importants (entre les basses et les hautes altitudes) qu'en hiver.

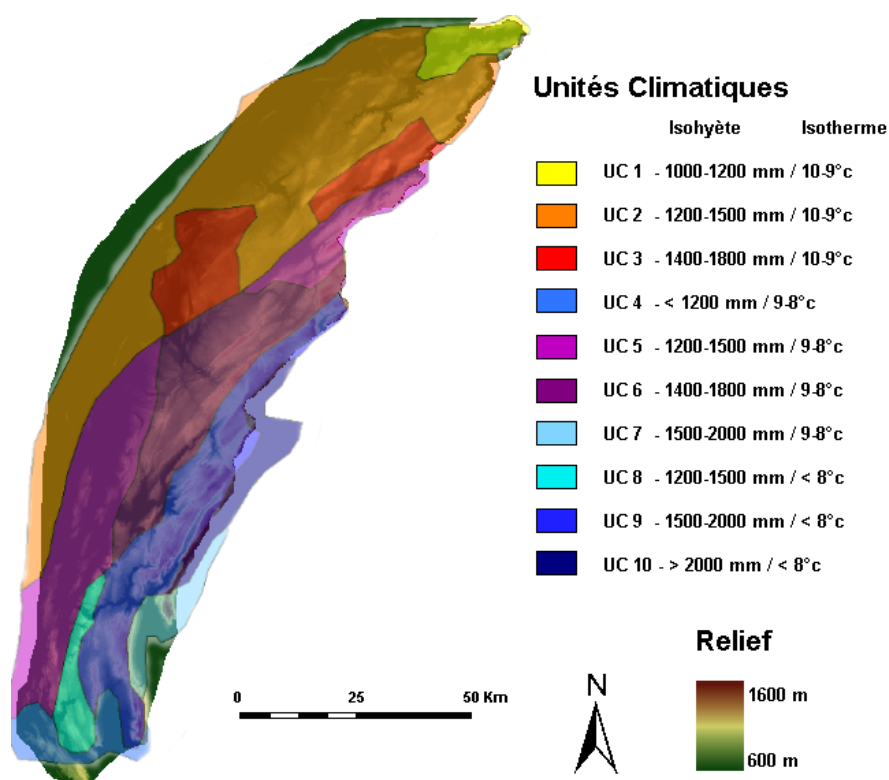


Figure 2.4. Sous-unités climatiques du massif jurassien, d'après les cartons climatiques des cartes de végétation de la France (n° 35, 42 et 48).

Cependant, les particularités du relief et l'orientation des vallées entraînent une nuance du climat général (enclaves de climat contrasté) et la mise en place de méso-climats.

Le découpage méso-climatique du massif jurassien montre qu'il existe une différenciation climatique entre les trois grands secteurs du massif : les premiers et deuxième plateaux, et la Haute-Chaîne, suivant les isothermes 9°C et 8°C. A l'intérieur de ce découpage thermique, la pluviométrie varie en fonction du relief, s'accroissant en allant vers les altitudes les plus élevées (Figure 2.4).

L'apparente homogénéité des unités climatiques cachent une hétérogénéité importante

liée à la forme du relief. En effet, dans les zones plissées du massif, le climat local dépendra de l'exposition des versants. L'orientation un facteur primordial dans la définition du mésoclimat.

La mise en place de zone de référence est nécessaire pour prendre en compte les variabilité climatique du massif jurassien. Les zones de références doivent tenir compte de la variation altitudinale qui conditionne la pluviométrie et les températures.

2.3. Caractéristiques générales des sols (forestiers) du massif jurassien.

(*Gaiffe, 1972 ; Michalet, 1982 ; Bruckert et Gaiffe, 1985, 1990 ; Tavant et Bruckert, 1986 ; Jouaffre et al, 1991 ; Groëll et Bruckert, 1993 ; Havliceck et Gobat, 1996 ; Baize, 1998 ; Duchaufour, 2001 ; IFN, 2008*)

Les sols se développent à partir du calcaire. Il s'agit du produit de la dissolution de la roche et les cailloux sont présents (nature, taille, abondance variables). Les sols qui sont situés sur des pentes plus ou moins marquées subissent un rajeunissement constant (actions combinées du climat, de la pente, de la végétation). Sur les plateaux calcaires karstiques jurassiens, les sols sont superficiels, calciques, riches en matière organique, bien structurés. A l'inverse, les sols des dolines sont profonds et acides. Les sols les plus profonds sont enrichis en apports alluviaux et éoliens. Les glaciers ont eu un impact important en rajeunissant les sols et en laissant d'immenses moraines. A la fin de glaciations, les vents ont déposé de nouveaux matériaux (limons non-carbonatés, riches en minéraux), jouant un rôle important sur la pédogenèse et permettant la mise en place de nouveaux sols.

La plupart des reliefs comtois présentent des calcaires au faciès relativement purs (Jurassique supérieur). Les dépôts du Jurassique inférieur sont constitués de calcaires marneux et des faciès riches en impuretés. En majorité, il s'agit de faciès durs. Toutefois, des sédiments tertiaires, généralement détritiques tendres, se sont déposés localement. Les mouvements tectoniques ont influencé la fracturation des roches qui ont répondu de façon différente en fonction de leur nature. Sur les faciès purs, l'effet est très important, en fonction du litage de la roche. Les calcaires fins ont été concassés et les calcaires massifs ont été cassés suivant l'écartement des diaclases donnant les lapiez. Sur les faciès impurs, plus souples, les dalles ont été déformées.

La gamme de pH de l'horizon A des sols forestiers est comprise entre 5 et 7.

Le massif du Jura est soumis à un climat tempéré particulièrement humide sous les influences continentale et océanique. Le relief entraîne une hétérogénéité des paramètres climatiques avec la mise en place de nombreux mésoclimats et microclimats (*Figure 2.4*).

La classification des sols forestiers passe en premier lieu par le type de roche mère qui conditionne la profondeur du profil, et par conséquence, le développement racinaire. Il faut également tenir compte de la nutrition dans le fonctionnement du sol, qui est influencée par l'étanchéité du substrat profond et capacité nutritive de la roche sous-jacente.

Ce contexte a permis le développement de sols d'une grande diversité pédologique. Les sols forestiers les plus fréquemment rencontrés dans le Massif du Jura sont décrits ci-après.

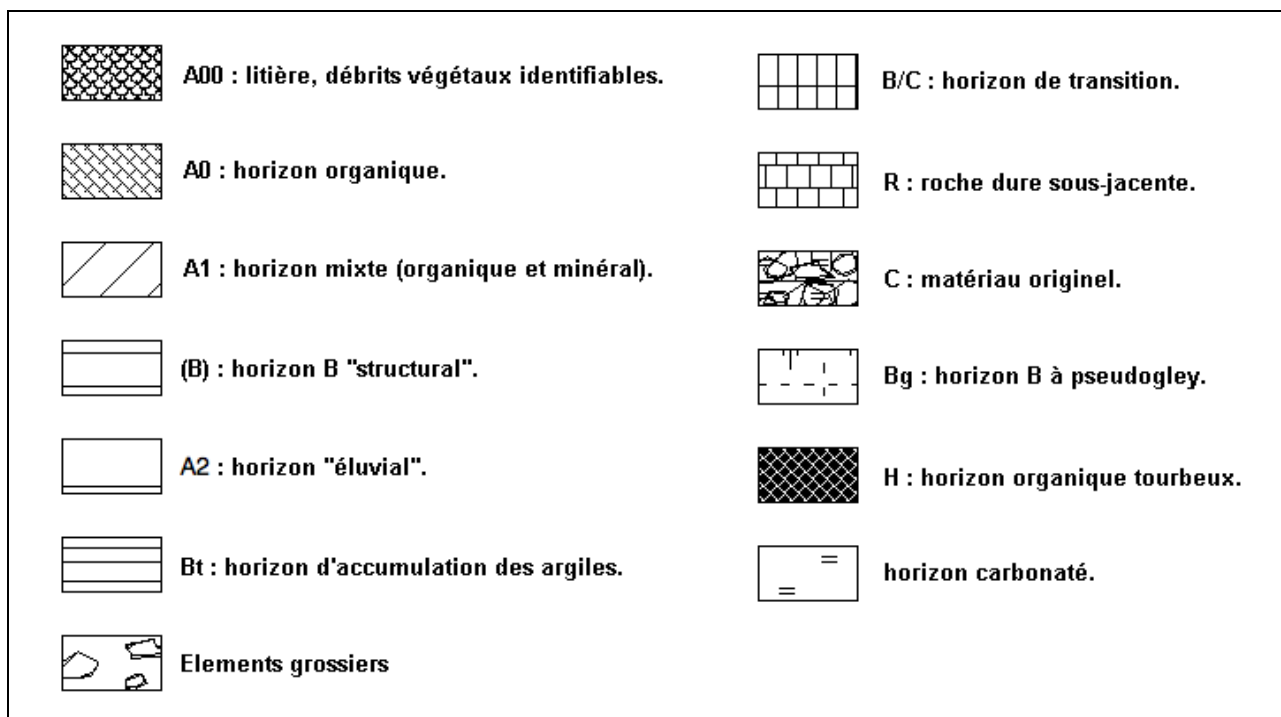


Figure 2.5. Légende des figurés illustrant les horizons.

Lithosol (Lithosol / Lithic leptosol)

Les lithosols font partie des sols des stades initiaux. Ils n'ont subi qu'une faible altération chimique. Ils se forment sur des roches dures pas ou peu altérées. Ils occupent des sommets, ou recouvrent des affleurements de la dalle calcaire. L'humus est de type mull, modérément épais ou mor calcaïque très acide épais. Leur profil type $A_0/A_1/R$ (Figure 2.6). Ils sont superficiels (0-20 cm). Ce sont des sols décarbonatés avec une bonne porosité. Les cailloux sont rares et émoussés. Leur texture est argilo-limoneuse et le taux de matière organique est très élevé (70%). Leur pH est proche de la neutralité (6,3) et la capacité d'échange cationique est élevée (50-110 cmol.kg⁻¹), pour un taux de saturation de 100 %.

Sols humo-calcaire (Organosol calcaire / Follic umbrisol) et humo-calcaïque (Organosol calcaïque / Follic umbrisol)

Ces sols appartiennent au groupe de sols à altération biochimique dominante et issu d'une carbonatation calcaïque.

Les sols humo-calcaires se forment en bas de pente, sur des éboulis instables. Le profil type est A_1/C avec un mull carbonaté (Figure 2.7). Il s'agit de sols profonds (80-100 m) malgré une grande richesse en éléments grossiers. La carbonatation est présente dans la terre fine. La matière organique est abondante et le pH est élevé (6 en surface, proche de 7 en profondeur). Ce sol quasiment saturé possède une forte capacité d'échange cationique.

Les sols humo-calcaïques se développent sur les affleurements de calcaire dur concassé et éboulis stabilisés en position sommitale, en pente légère ou sur le plat. Le profil type est composé d'un eumull sur A_1/C . L'horizon A_1 est très épais. Leur profondeur va jusqu'à 40 cm. Ces sols présentent des cailloux anguleux sur tout le profil. La terre fine est décarbonatée et sa porosité est très bonne. La texture varie d'argileux à argilo-limoneux avec un taux de matière organique important (> 40%). Le pH est élevé (autour de 6 en

surface et proche de 7 en profondeur), la capacité d'échange cationique est élevée (50-110 cmol.kg⁻¹) et le pourcentage de saturation est important (70-100%).

Sol brun calcaire (Calcosol / Calcaric Cambisol)

Ces sols appartiennent au groupe de sols à altération biochimique dominante et issu d'une carbonatation calcique. Ils se développent en bas de fortes pentes sur des calcaires dur ou marneux. Il s'agit de sol profond à mul carbonaté, ayant pour profil A₁/B/C. L'horizon B est bien développé (*Figure 2.8*). La pierrosité du sol est importante et la carbonatation s'élève jusqu'à 20 % dans l'horizon B. La porosité de ces sols est moyenne puisque la texture est argileuse. Le taux de matière organique est important en A₁ (30 %). Le pH est important (7). Il s'agit de sols saturés ayant une forte capacité d'échange cationique (50-110 cmol.kg⁻¹).

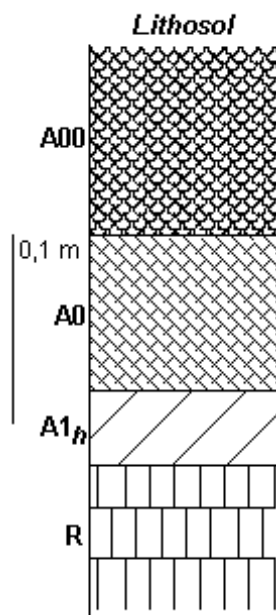


Figure 2.6. Profil type d'un lithosol.

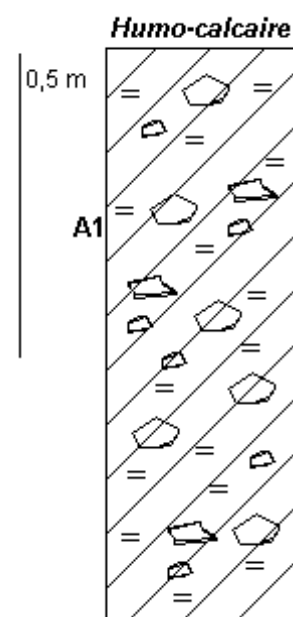


Figure 2.7. Profil type d'un sol humo-calcaire.

Sol brun calcique (Calcisol / Hypereutric Cambisol)

Ces sols appartiennent au groupe de sols à altération biochimique dominante et issu d'une carbonatation calcique. Ils se développent sur les calcaires dur en situation topographique plane. Ils sont formés d'un mull carbonaté et des horizons A₁/B/C (*Figure 2.9*). L'horizon B est bien développé. Les sols bruns calciques se caractérisent par une pierrosité importante et une profondeur moyenne (jusqu'à 30 cm). Le taux de carbonatation est de 40%. La texture est argilo-limoneuse procurant une porosité moyenne. Le taux de matière organique est moyen (10%). Ces sols saturés ont une capacité d'échange cationique moyenne (30 cmol.kg⁻¹) et un pH proche de 7.

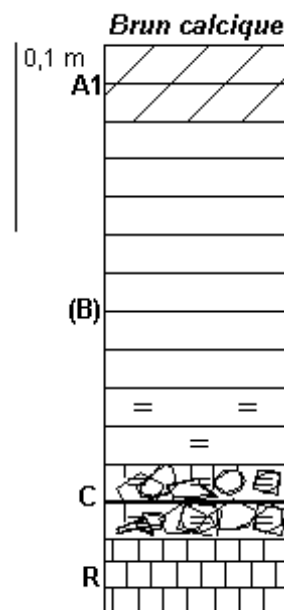
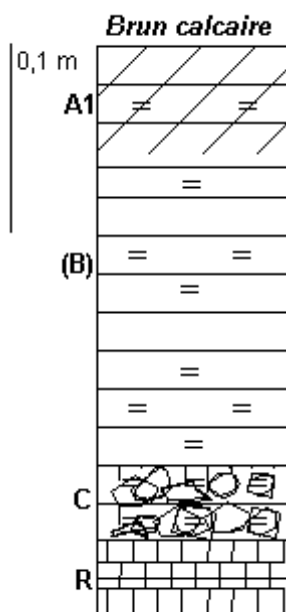


Figure 2.8. Profil type d'un sol brun calcaire. Figure 2.9. Profil type d'un sol brun calcique.

Sol brun eutrophe (Brunisol subsaturé / Eutric cambisol) et mésotrophe (Brunisol mésosaturé / Eutric cambisol)

Ces sols font partie du groupe à altération biochimique dominante et issu d'une brunification à laquelle peut s'ajouter un lessivage. Il s'agit de sols à évolution « climatique » des régions tempérées humides. Ces sols se développent sur tout type de substrat riche en bases en position sommitale, en pente faible ou sur le plat. L'humus est un mull peu épais (eumull ou mésomull). Le profil type est formé de trois horizons A₁/B/C (Figure 2.10 et 2.11). Pour les sols bruns eutrophes, l'horizon B est de type structural (noté (B)). La gamme de profondeur est variable mais les sols mésotrophes se différencient par l'absence de cailloux. La carbonatation est faible. Ces sols présentent une bonne porosité. La gamme de texture est large, de limoneux à argilo-limoneux et le taux de matière organique peut être important (15-30%). Le pH augmente avec la profondeur (de 5,5 à proche de 7). La capacité d'échange cationique de ces sols est élevée (50 à 70 cmol.kg⁻¹) avec un pourcentage de saturation supérieur à 60% (supérieur à 80% pour les sols bruns eutrophes).

Sol brun acide (oligotrophe) (Brunisol oligosaturé / Dystric brunisol)

Ces sols font partie du groupe à altération biochimique dominante et issu d'une brunification à laquelle peut s'ajouter un lessivage. Il s'agit de sols à évolution « climatique » des régions tempérées humides. Ils se forment sur des matériaux variés mais riche en bases, sur les sommets et les zones de plat. Les humus caractéristiques de ces sols sont un oligomull soit un dysmull. Le profil de ces sols suit le format A₀/A₁/B₁/B₂/C (Figure 2.12). Il s'agit de sols de profondeur faible à moyennement profonde. La carbonatation est absente malgré la présence d'éléments grossiers en profondeur. Ces sols présentent une texture limoneuse à limono-argileuse avec une porosité moyenne et un taux de matière organique de 5 à 20% (40% A₀). Les sols bruns acides présentent un pH faible (4,6) qui augmente en profondeur (6,4). La capacité d'échange cationique est moyenne (10 à 45 cmol.kg⁻¹) et le taux de saturation est faible à moyen (5 à 30%).

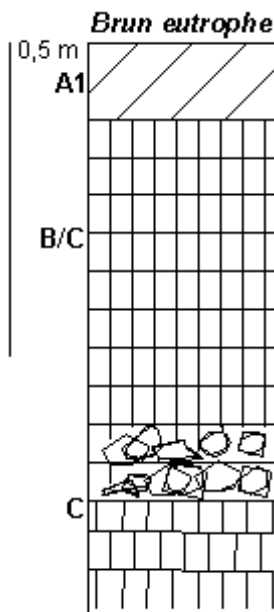


Figure 2.10. Profil type d'un sol brun eutrophe.

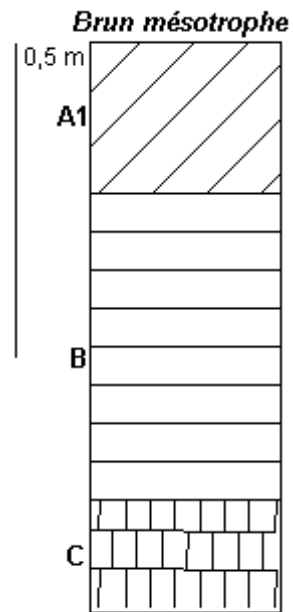


Figure 2.11. Profil d'un sol brun mésotrophe.

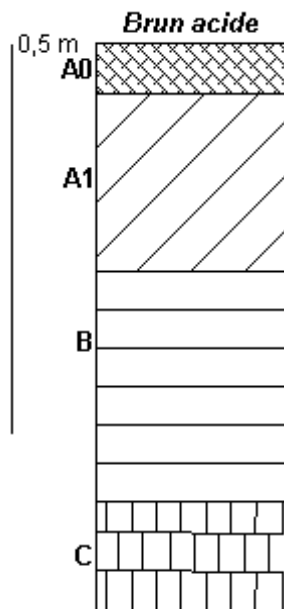


Figure 2.12. Profil type d'un sol brun acide.

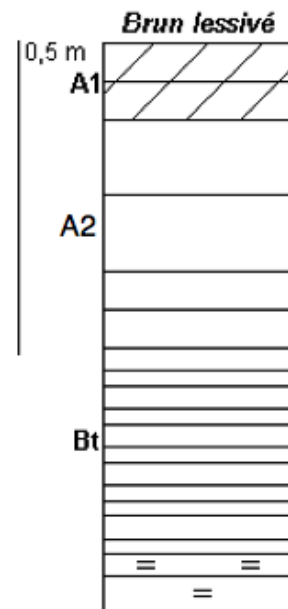


Figure 2.13. Profil type d'un sol brun lessivé.

Sol brun lessivé (Néoluvisol / Luvic cambisol)

Ce sol fait partie du groupe à altération biochimique dominante et issu d'une brunification à laquelle peut s'ajouter un lessivage des argiles vers la profondeur. Il exige une décarbonatation complète si le matériau est calcaire. Ce sol est dit « à évolution climatique » des régions tempérées humides. Il se développe dans les dépressions sur des substrats très variés, des roches sédimentaires meubles mais généralement riches en limons. Le profil type est composé des horizons A₁/A₂/B_t/C avec un mull oligotrophe ou dystrophe (Figure 2.13). Ils sont profonds et dépourvus de cailloux. Les sols lessivés présentent des horizons poreux à faiblement poreux en profondeur. La texture en A₂ est limoneuse et elle devient argileuse en B_t. Le taux de matière organique est faible (< 5%). Il s'agit de sols à pH acide (5) avec une augmentation en profondeur jusqu'à 7. Ces sols ont

une capacité d'échange cationique faible ($< 30 \text{ cmol.kg}^{-1}$) avec un pourcentage de saturation moyen en A_1 (30-60 %) et fort en B_t (75-100 %).

Variation de profils et cas particuliers

Sol colluvial

Ensemble de sols peu évolués d'apport, qui se forment en bas de pente, par accumulation de matériaux de toute taille. Il s'agit de sols souvent profonds et riches en matière organique. L'attribut « colluvial » peut s'ajouter à un sol, modifiant ainsi ses propriétés (Exemple : sol brun lessivé colluvial, sol calcaire colluvial, sol humo-calcaire colluvial).

Sol brun à pellicule calcaire

Le sol brun à pellicule calcaire fait partie des originalités franc-comtoises. A l'interface de la roche et de la terre fine, une couche de poudre blanche réagit intensément au test de l'acide chlorhydrique. Ce sol se développe sur une dalle compacte ou banc peu diaclasé, se débitant en cailloux. Sa profondeur est comprise entre 10 et 30 cm. Le sol brun à pellicule calcaire s'apparente à un sol brun calcique.

Sols hydromorphes

Les sols hydromorphes sont soumis à une oxydo-réduction, liée aux conditions physico-chimiques de la station. L'excès d'eau, par une saturation temporaire ou permanente, rend le milieu réducteur, conséquence d'un déficit d'oxygène. Il s'agit de variantes de sols drainés, présentant des tâches d'oxydation ou de réduction du fer, sur une partie ou sur la totalité du profil.

Les horizons à gley sont de type réductique est de couleur grise. La répartition du fer homogène. Les sols à gley présentent une nappe d'eau permanente circulant à la surface d'un substrat imperméable. La nappe oscille plus ou moins entraînant la formation de sols à gleys aux propriétés réductiques strictes ou réoxydées (Exemples : gley oxydé à hydromull A_1/G_0 , gley humifère oxydé et réduit $A_1/G_0/Gr$, gley réduit à anmoor $A_{11}/A_{12}/G_r$, Sol humique à gley A_1/G_r , tourbes, gley blanchi à hydromor $A_1/A_{2g}/G_r$, gley podzolique A_1/G).

La tourbe (histosol / histosol) s'accumule puisque la matière organique n'est pas recyclée à cause de la stagnation d'une eau peu oxygénée et les basses températures. L'alimentation en eau des nappes provient du ruissellement sur les calcaires ou uniquement des pluies, permettant la mise en place de tourbières calciques ou basiques. La tourbe se développe dans les dépressions sur un substrat imperméable. L'humus est un hydromor. Le profil type est constitué par des horizons histiques qui recouvrent un horizon G (*Figure 2.14*). Ces sols, dépourvus de cailloux, peuvent être très profonds (plusieurs mètres). Les histosols sont décarbonatés mais très poreux. Néanmoins, l'eau occupe la porosité. Le taux de matière organique est de 100%. Le pH peut aller de très acide à proche de la neutralité (dépend du fonctionnement et de l'alimentation hydrique). La capacité d'échange cationique est très élevée dans ces sols ($100\text{-}500 \text{ cmol.kg}^{-1}$).

Les horizons à pseudogley sont de type rédoxique. Ils sont la conséquence d'une hydromorphie de surface. La porosité diminue de la surface à la base du profil ce qui entraîne la stagnation temporaire de l'eau. Le profil présente des horizons à pseudo-gley (A_g , B_g) avec des tâches d'oxydation et de réduction du fer, plus ou moins étendues

(Figure 2.15) (Exemples : pseudogley mésotrophe $A_1/A_{2g}/B_g$, stanogley $A_1/A_{2g}/B_g$, sol brunifié à pseudogley $A_1/B/B_g$ A_1/B_g , sol lessivé à pseudogley $A_1/A_2/B_{tg}$ ou $A_1/A_{2g}/B_{tg}$). Les conditions physico-chimiques et géomorphologiques, et le rôle de la végétation influencent la formation des pseudogley. Le taux de matière organique est important en surface formant un mull acide. La capacité d'échange cationique et le taux de saturation augmentent avec la profondeur (exception du premier horizon riche en matière organique).

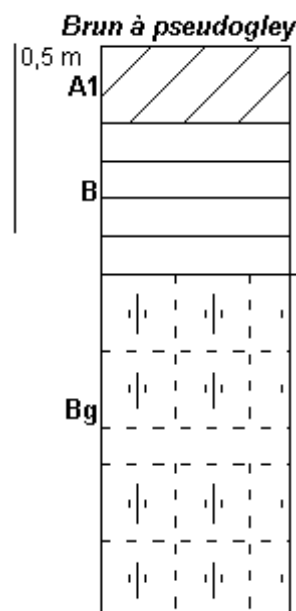
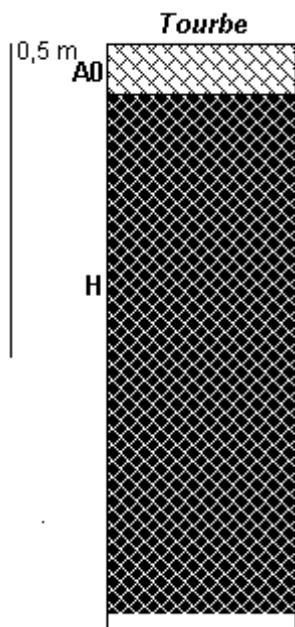


Figure 2.14. Profil type d'une tourbe. Figure 2.15. Profil type d'un sol brun à pseudogley.

3. Espèces étudiées.

(Bert, 1992 ; Rameau et al., 1993 ; Lucot, 1994 ; Burnand et al., 1998 ; SFFC, 1997 ; Drénou, 2006)

3.1. Epicéa commun (*Picea abies* L.).

L'épicéa commun (*Picea abies* L.) est un arbre résineux de la famille des Pinacées (Figure 2.16 et 2.17).

Il croît de façon spontanée dans le Haut-Jura. Son altitude de présence naturelle est d'environ 800 m et jusqu'à 2000 m. On le retrouve cependant en plantations sur des altitudes moins élevées et même jusqu'en plaine. On peut le retrouver en pessières naturelles à l'étage montagnard (sur lapiaz, éboulis rocheux, sol tourbeux), en association avec le hêtre (*Fagus sylvatica*) ou bien avec le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.).

Morphologie

Cet arbre au fût rectiligne peut dépasser 50 m et peut vivre jusqu'à 400 ans. Il présente un bois blanc et tendre avec un grain de grain fin peu nerveux. Le bois de l'épicéa est facile à travailler. Il est utilisé pour de nombreuses applications en fonction de sa qualité mécanique. On le retrouve en menuiserie intérieure ou extérieure, mais également en charpentes légères, échafaudages et coffrages. Les bois les plus anciens, denses et au fil droit sont utilisés en lutherie.

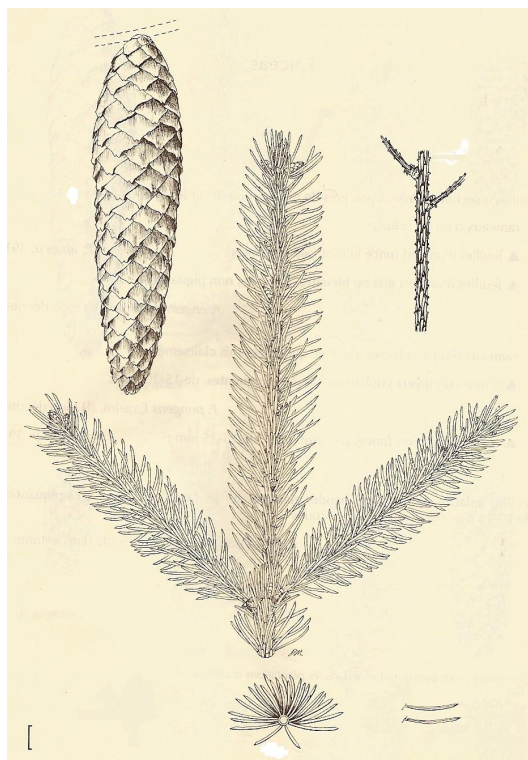


Figure 2.16. Rameau, aiguilles et fructification de *Picea abies* (Rameau et al., 1993).

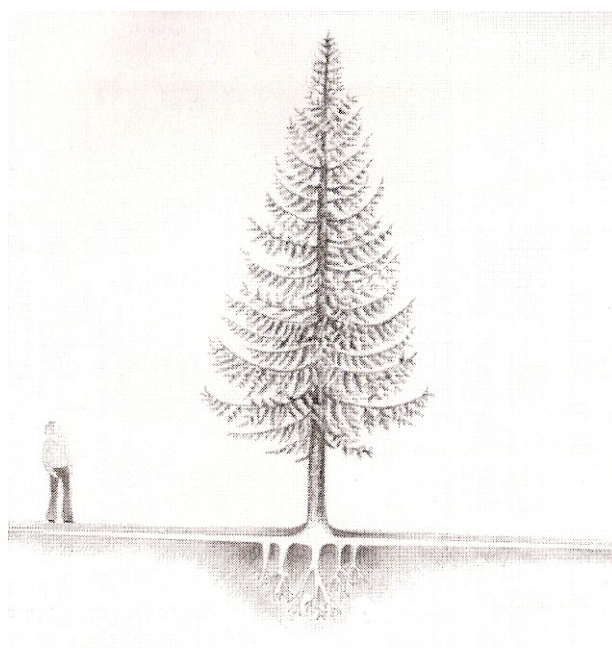


Figure 2.17. Silhouette et système racinaire de *Picea abies* (Drénou, 2006).

Système racinaire (Drénou, 2006)

A partir du pivot primaire, partent 3 à 5 racines charpentières linéaires qui forment une couronne horizontale et superficielle. De nombreux pivots secondaires verticaux apparaissent sous les charpentières, de façon centrifuge. D'autres pivots, à des profondeurs variables, prolongent les pivots secondaires. Ce système racinaire superficiel peut le rendre sensible aux chablis.

Ecologie

Cette espèce est très résistante au froid et aux gelées tardives grâce à un débourrement tardif. Cependant, elle demande de la lumière, sauf durant le développement où elle peut supporter un certain ombrage. L'épicéa préfère les climats humides mais peut supporter la sécheresse de l'air si le sol est frais. Cette espèce a une répartition étendue sur les gradients trophiques et hydriques (*Figure 2.18*). L'épicéa se répartit suivant deux cas de figures. Il sera soit de milieu méso-hygrophile à méso-xérophile, hyper-acidiphiles à acidiclinales, soit de milieu méso-hydrocline à méso-xérophile, acidiclinales à calcicoles. Il est tolérant à une grande variété de sols (même calcique ou hydromorphe) si toutefois celui-ci n'est pas trop riche en carbonates. L'humus issu de la dégradation lente de ses aiguilles est généralement un dysmoder (voire mor).

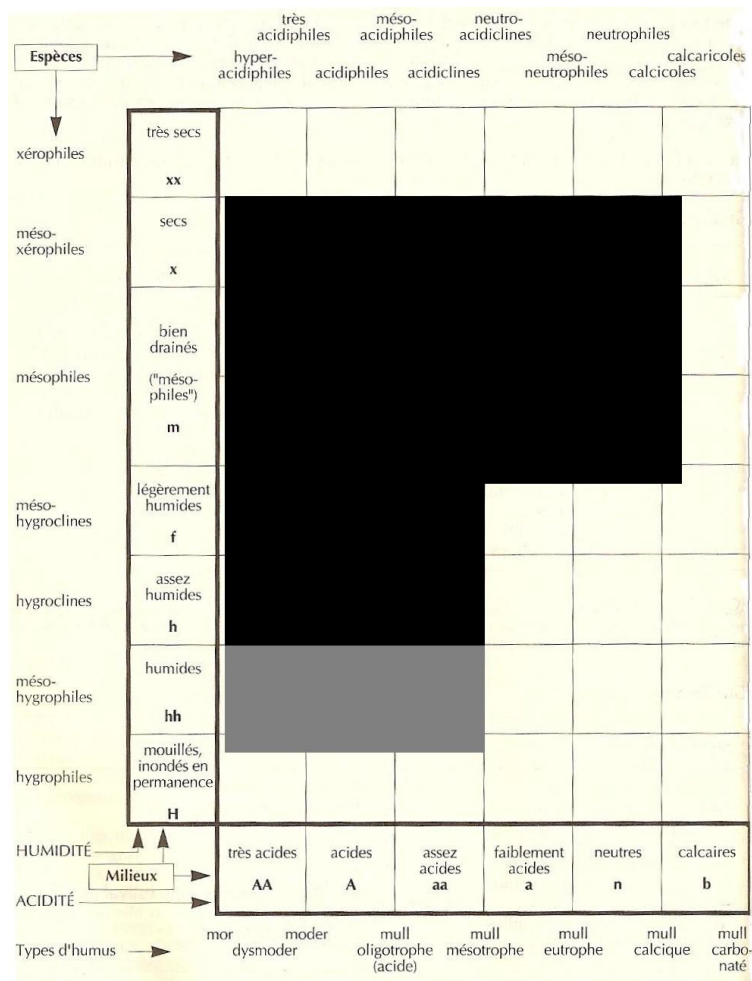


Figure 2.18. Diagramme des gradients trophiques et hydriques pour *Picea abies* (Rameau et al., 1993).

3.2. Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.).

Le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) ou sapin blanc, est également un arbre de la famille des Pinacées (*Figure 2.19* et *2.20*).

On le retrouve à l'état naturel dans les régions montagneuses. C'est la seule espèce de sapin qui pousse de façon spontanée en Europe occidentale (de 400 à 1800 m). C'est un arbre de grande taille qui peut atteindre 50 m comme l'épicéa. Il peut vivre jusqu'à 200

ans. Il est souvent associé en futaie avec le hêtre pour les étages les plus bas. Dans l'étage montagnard supérieur, il peut être associé à l'épicéa.

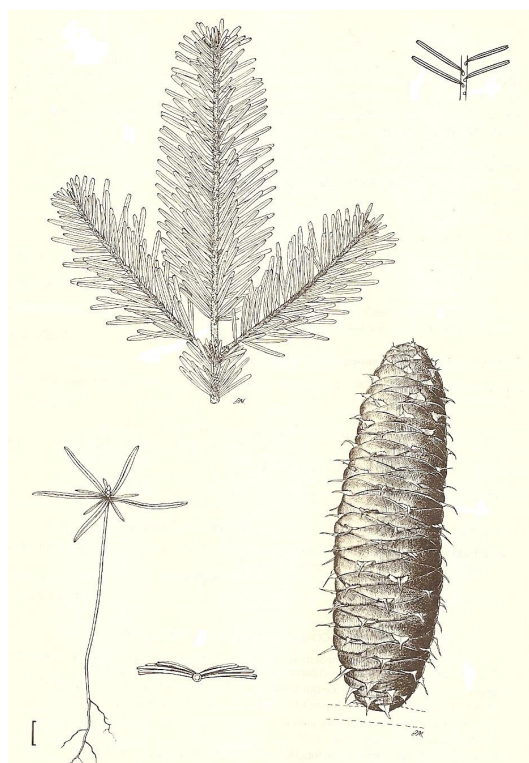


Figure 2.19. Rameau, aiguilles, jeune pousse et fructification d'*Abies alba* (Rameau et al., 1993).

Morphologie

Le bois du sapin pectiné présente des cernes d'accroissement très visibles. Il est jaunâtre, peu nerveux, élastique et tendre. Il est résistant et peut subir de nombreux traitements (usinage, collage, peinture). c'est un bois excellent pour la menuiserie, la charpente légère et de grande portée. Il peut être aussi utilisé en aéronautique.

Système racinaire (Lucot, 1994 ; Drénou, 2006)

Le sapin pectiné adulte présente une couronne de charpentières horizontales dans un rayon de 2 m autour du collet puis de nombreux pivots verticaux et profonds. Ce système racinaire est pivotant avec 4 - 5 contreforts, pendant la jeunesse. Ils se divisent en deux racines horizontales à 1 - 1,5 m puis à 1,5 - 2 m du tronc. Ensuite, les racines restent linéaires. Chaque contrefort est à l'origine de 4 - 8 racines charpentières autour du collet. Entre 80-90 cm, des pivots secondaires apparaissent sous les charpentières. Ils sont droits et verticaux donnant naissance à 2 - 3 racines pivotantes. En cas d'absence de contraintes, elles peuvent descendre à 2,5 m de profondeur. La pente a une forte influence sur la répartition et la densité des racines. En effet, l'accentuation de la pente entraîne une réduction du volume prospectable pour les racines. La réserve utile du sol et l'assise mécanique sont alors limitées. Ces conditions entraînent une asymétrie du système racinaire.

Ecologie

Le sapin blanc supporte le froid mais ses bourgeons sont sensibles aux gelées tardives. Il tolère l'ombre dans les premières années de sa vie. Il exige une humidité du sol

importante et constante. Comme son système racinaire se développe en profondeur, surtout si la roche est fissurée, il est plus résistant au vent que l'épicéa. Il est sensible à la richesse chimique du sol (*Figure 2.21*).

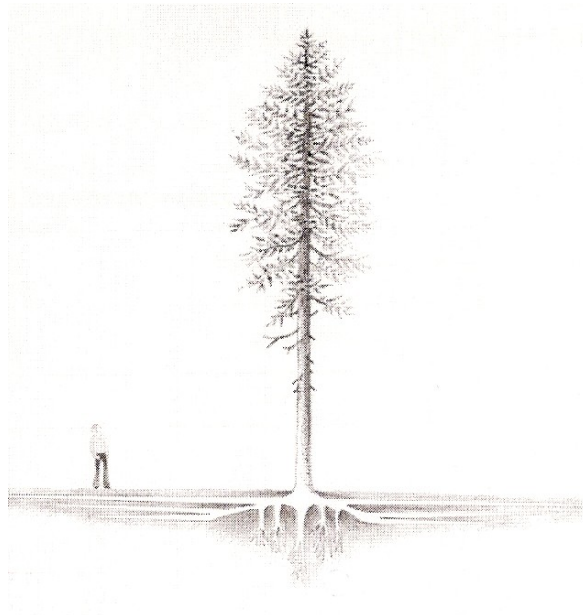


Figure 2.20. Silhouette et système racinaire d'Abies alba (Drénou, 2006).

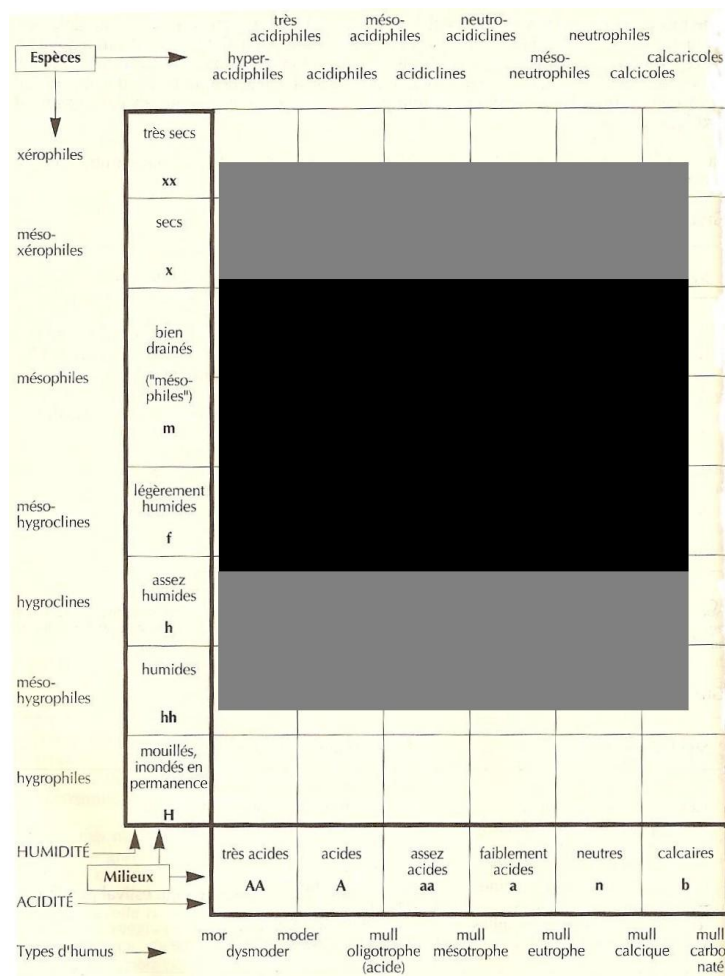


Figure 2.21. Diagramme des gradients trophiques et hydriques pour Abies alba (Rameau et al., 1993).

Cependant, il est rare sur les sols carbonatés ou hydromorphes et inexistant sur les sols squelettiques. Sa répartition est donc étendue sur les gradients trophiques et hydriques. Le sapin pectiné se répartit sur des milieux méso-hygrophiles à xérophiles, hyper-acidiphiles à calcicoles.

3.3. Les forêts du massif du Jura.

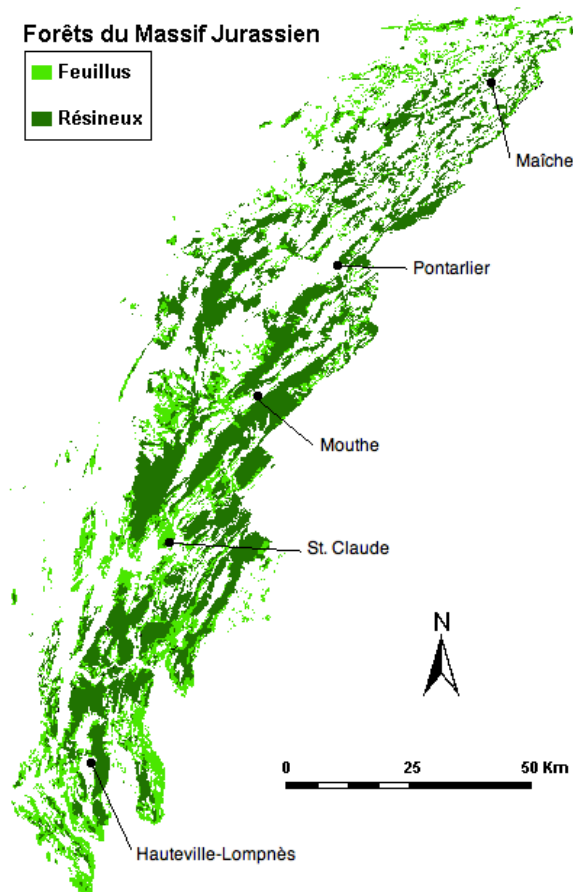


Figure 2.22. Les forêts du massif jurassien. Les parcelles à dominante « feuillue » ou « résineuse » y sont représentées (source : ONF).

Les différentes associations végétales correspondent aux forêts résineuses dans le Massif Jurassien (Figure 2.22) (Tableau 2.2).

L'arc jurassien est dominé en altitude par des séries calcicoles à eutrophes dans le nord comme les hêtraies froides à dentaire et les hêtraies-sapinières à dentaire (Rameau et al., 1991). Dans la partie centrale, la chaîne du Jura est représentée par des séries montagnardes comme la série froide et calcicole du hêtre à *Cardamina heptafylla* et la série de la hêtraie-sapinière (Rameau et Richard, 1990). Dans le sud, les unités forestières correspondent aux séries du hêtre et du sapin (ou de l'épicéa) : série du hêtre et du sapin au faciès du hêtre, série du hêtre et du sapin au faciès du sapin, série de l'épicéa montagnard supérieur jurassien (Richard et Hainard, 1981).

Les stations à résineux sont présentes en altitude, à partir de l'étage collinéen (Burnand et al., 1998 ; SFFC, 1997). Elles sont présentes sur tout type de topographie, des plateaux aux pentes très marquées. La géologie et les sols présente une palette de potentialité de

présence importante. Le sapin et l'épicéa pourront être associés, en fonction de la station, au hêtre, au frêne et à l'érable.

En altitude, la propriété des parcelles est principalement communale (*ifn.fr*), mais également domanial.

Une différence de gestion sylvicole est notée entre les départements. Dans le Doubs, c'est la futaie régulière qui est majoritairement employée alors que dans le Jura, les forestiers appliquent la futaie jardinée. L'élévation de l'altitude et l'accentuation des pentes conditionnent la difficulté d'exploitation des arbres, entraînant la nécessité de choix vers le jardinage.

La gestion en futaie régulière correspond à un système d'aménagement équienne, c'est à dire que les arbres ont tous le même âge, qu'ils soient issus de plantation ou bien de la régénération naturelle. L'entretien est possible pour favoriser telle ou telle espèce grâce à des éclaircies. Une fois que le peuplement a atteint son âge d'exploitation, une coupe dite « à blanc » est réalisée.

La gestion en forêt régulière permet de produire des bois à croissance régulière ayant une très haute qualité. Le peuplement est rendu pur par élimination des espèces non-désirées. La concurrence et la compétition par d'autres espèces est donc réduite.

La gestion en futaie jardinée (ou irrégulière) correspond à un système d'aménagement inéquienne, c'est à dire que le peuplement présente des arbres de tout âge. La récolte est périodique et progressive et se fait selon les besoins, arbre par arbre.

La gestion en futaie jardinée permet d'augmenter la protection contre le vent et cicatrisation rapide en cas de chablis. De plus, ce mode de gestion permet de protéger le sol contre l'érosion, d'où la présence courante des futaies irrégulières en montagne.

La production de bois est forte (sensiblement supérieure à celle des futaies régulières) puisque la concurrence entre les houppiers des arbres adultes limitée, compte-tenu de la cohabitation d'arbres de toutes les dimensions. La structure étagée en escalier permet de laisser la lumière vers les strates inférieures.

		<i>Doubs (25)</i>	<i>Jura (39)</i>	<i>Ain (01)</i>
Surface totale (ha)		213000	216000	168000
Type peuplement	<i>Futaie de résineux</i>	55000	51000	51000
Essence principale	<i>Sapin pectiné</i>	44000	36000	21000
	<i>Epicéa commun</i>	50000	34000	20000
Superficie par classe d'altitude	<i>600 – 1000 m</i>	74000	69000	59000
	<i>1000 – 1400 m</i>	27000	26000	24000
	<i>0 – 15 %</i>	105000	134000	68000
Superficie par classe de pente	<i>15 – 30 %</i>	53000	41000	37000
	<i>30 – 70 %</i>	50000	37000	56000
	<i>> 70 %</i>	-	-	6000

Tableau 2.2. Surface (ha) des peuplements de résineux des départements du Doubs, du Jura et de l'Ain (*ifn.fr*).

4. Le zonage « AOC Bois du Jura ».

Malgré sa notoriété reconnue (*Martin, 2003 ; Sauget, 2004*), il n'existe que très peu d'études sur les potentialités qualitatives des résineux du Massif Jurassien (*cf. Chapitre 1*).

La caractérisation d'un terroir sylvicole étant une démarche nouvelle, il est nécessaire de s'inspirer des démarches antérieures de définitions d'AOC sur d'autres produits, tels que le vin ou le fromage.

Monnet (1996) a défini les unités de terroir de l'AOC « Comté » comme une association climat-sol-roche intégrant les critères d'emplacement, d'organisation et de contraintes. Les unités agro-pédologiques prairiales (UAP) permettent de définir les différents crus. Cette méthodologie est extrapolable hors contexte jurassien.

Vaudour (2003) a traité des principales méthodes de zonage, pour les terroirs viticoles. La définition d'unités terroir de base (UTB) se concentre sur un ensemble de parcelles qui se veulent représentatives et dont la prospection se fait suivant un échantillonnage raisonné. Les caractéristiques climatiques et les propriétés édaphiques ont un rôle important sur la vigne. Il est nécessaire de prendre en compte l'intégralité de ces paramètres.

Les recherches bibliographiques ont montré que les propriétés écologiques avaient une influence forte sur la croissance et la densité du bois de résineux (climat, géologie, topographie, gestion forestière). La connaissance de ces paramètres, à l'échelle du massif est indispensable à la définition des unités de potentialité sylvicoles. Cependant, les connaissances sur l'influence des paramètres stationnels à une échelle très fine sont limitées. Or, la connaissance des paramètres tels que la profondeur du sol, la nutrition hydrique et minérale et la compétition est pourtant indispensable pour expliquer la densité du bois.

Lors de la caractérisation d'un terroir, il est nécessaire de qualifier et quantifier l'influence des paramètres environnementaux à l'origine du produit. La somme de tous ces paramètres permet de définir ce zonage. Les informations cartographiques doivent être inventoriées afin de connaître les lacunes pour la définition des unités de « terroir sylvicole ». Quatre ensembles de paramètres ont été retenus : le climat, la géologie, la topographie, le sol.

La surface importante de la zone d'étude entraîne un choix méthodologique s'orientant vers la mise en place de zones de référence qui seront élargies au massif dans son ensemble. L'inventaire et l'étude des différents paramètres écologiques doivent permettre de définir les zones de référence ainsi que les stations d'étude.

4.1. Recensement de l'information cartographique.

Les besoins ayant été identifiés, il est nécessaire d'inventorier l'information cartographique disponible pour la zone d'étude. Cet inventaire a porté sur les conditions d'accès, d'exploitation et le type (raster, vecteur, papier, tableau de données) de ces sources afin de mettre en évidence les lacunes à combler ultérieurement.

Le tableau 2.3 montre que les sources cartographiques sont variées suivant le thème recherché. Les grands organismes d'étude et de recherche (ONF, BRGM, IGN...) se présentent des sources fiables. Cependant, les données brutes sont rarement dans un format exploitable directement, et demandent un travail d'homogénéisation préalable.

	Forêt	Climat	Géologie	Topographie	Sol
<i>Intérêts</i>	- Connaissance des massifs forestiers de l'Arc jurassien (Peuplements et gestion).	- Caractérisation du Terroir sylvicole.	- Caractérisation du Terroir sylvicole.	- Caractérisation du Terroir sylvicole.	- Caractérisation du Terroir sylvicole.
<i>Sources (Types de données)</i>	- Spatialisation.	- Elaboration de la carte de propriétés des sols.	- Elaboration de la carte de propriétés des sols.	- Elaboration de la carte de propriétés des sols.	
	- Carte des parcelles forestières - ONF (Arcview, vectorisée).	- Bilans mensuels départementaux, Météo France (pdf).	- Cartes BRGM 1/50000, scannées (Arcview, raster).	- Modèle numérique de terrain (MNT) de la Franche-Comté, résolution 50 m (raster).	- Carte « Eurosols » (échelle très large peu exploitable).
<i>Traitement nécessaire</i>	- Cartes de végétation n° 35/42/48 - CNRS (papier).	- Cartes des isothermes et des isohyètes, Cahiers de l'atlas de Franche-Comté (1976, 1978, 1981) (papier).		- MNT SRTM DTED France-Suisse-Allemagne, résolution 100 m (raster).	
		- Cartes de végétation n° 35/42/48 - CNRS (papier).			
	- Création d'un calque en négatif pour la numérisation des autres couches d'information.	- Numérisation des unités climatiques (vecteur)	- Tri des étages géologiques par faciès.	- Changement de résolution en fonction de l'échelle.	- Mise en place d'un protocole d'étude pour produire la carte des propriétés des sols forestiers.
			- Numérisation des unités géologiques (vecteur).	- Numérisation des unités topographiques (vecteur).	

Tableau 2.3. Synthèse de l'inventaire de l'information cartographique disponible.

4.2. La démarche scientifique de l'étude.

La démarche utilisée pour cette étude est résumée grâce à un schéma décrivant les différentes phases de travail (Figure 2.23).

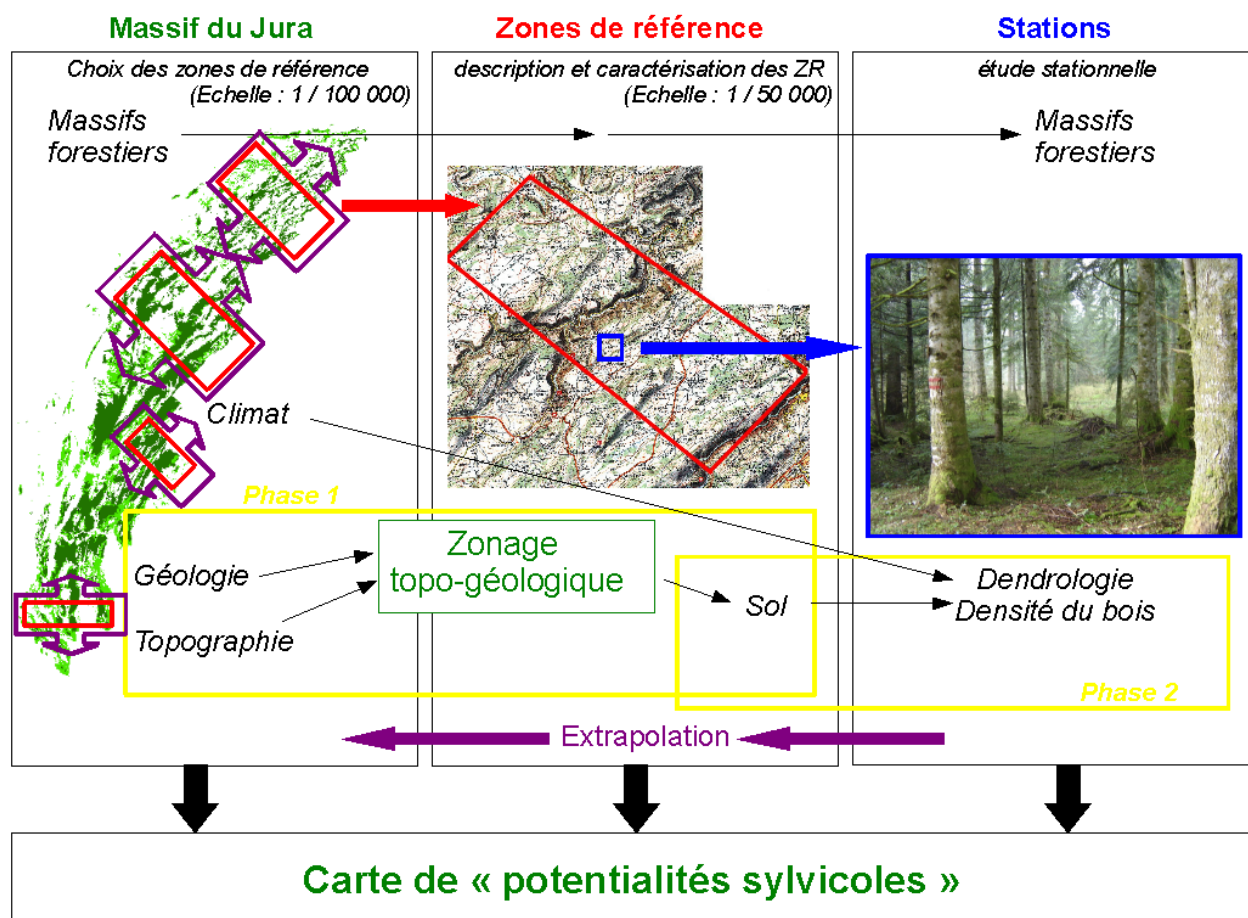


Figure 2.23. Schéma de la démarche scientifique développée dans cette étude. Trois échelles de travail sont concernées : le massif dans son ensemble, la zone de référence, la station. Les différentes phases d'étude (phase 1 et phase 2) sont imbriquées selon leur échelle. Les résultats sont extrapolés de l'échelle la plus fine à l'échelle la plus large afin d'obtenir une cartographie de « potentialités sylvicoles ».

Après avoir choisi et défini des zones de référence (ZR), notre stratégie s'oriente vers deux phases d'études qui sont complémentaires et impliquant un changement d'échelle.

Dans un premier temps, les sols sont décrits et spatialisés à l'intérieur des ZR (1/50000) puis extrapolés à l'échelle du massif (1/100000).

En second lieu, une étude est réalisée à l'échelle stationnelle sur un échantillon de situations (complexe de paramètres écologiques) représentatives du massif.

Le croisement de ces deux phases d'étude doit permettre d'extrapoler les potentialités sylvicoles, à l'échelle du massif (1/100000) et à une altitude minimale de 600 m. Ce zonage doit permettre ensuite la définition de zones écologiques à l'origine d'un éventail de données de densité de bois correspondant à la l'influence du climat, de la géologie, de la topographie et des paramètres du sol (profondeur, pierrosité, réserve en eau, pH).

5. Les zones de référence (ZR).

Les facteurs généraux caractérisant la zone d'étude étant connus, la surface concernée rend impossible une étude exhaustive du massif du Jura.

Le massif jurassien est étudié par l'intermédiaire de quatre zones de référence (ZR) (Figure 2.24), bandes transversales est-ouest échelonnées du nord au sud du massif. Ces ZR doivent permettre de décrire la variation morphologique et géologique nord-sud du Massif du Jura, mais également la diversité altitudinale ouest-est. L'altitude minimale retenue est 600 m, correspondant à la limite naturelle de présence de l'épicéa.

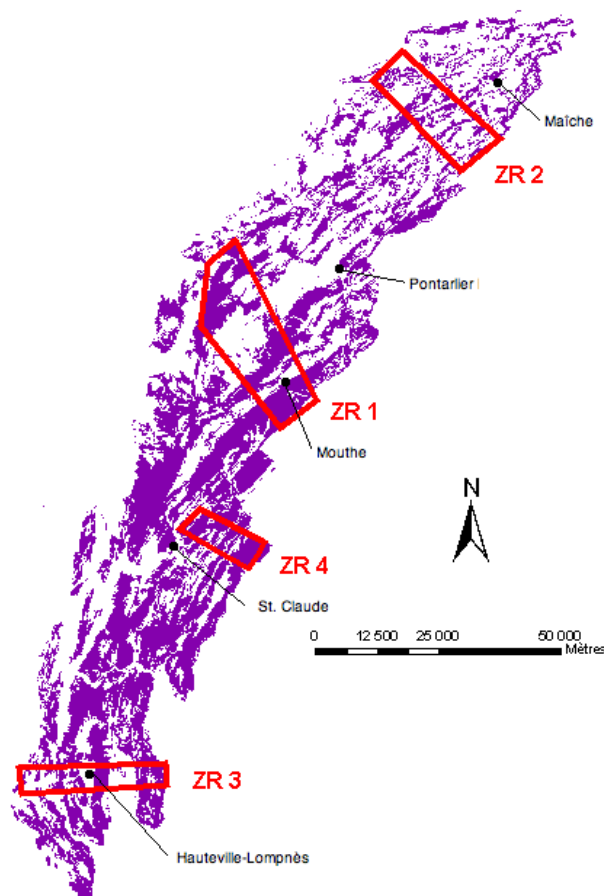


Figure 2.24. Localisation des zones de référence (ZR) au sein du massif du Jura.

5.1. Zone de référence 1 : axe Levier / Frasné / Mouthe (partie centrale du massif) (Figure 2.25).

Altitude

La gamme d'altitude de la zone de référence 1 est comprise entre 600-700 m et 1300-1400 m. Les classes se répartissent de façon relativement homogène au sein de la zone de référence. L'altitude la plus courante est comprise entre 800 et 1000 m.

Faciès géologiques

La diversité est importante pour les unités géologiques « calcaires » (j1b / j1c / j1c-2 / j5A / j6 / j7-6 / j7b / j8a) et du complexe « indéterminé marno-calcaires » (j2 / j3 / j5 / j7 / j8 / j9 / jP / n1-2). Trois autres unités présentes sont moins diversifiées : « marnes » (j4-3b),

« glaciaire » (Gx / Gxj) et « alluvions » (Fyz / Fz). Cette zone de référence présente un grand ensemble calcaire du Bajocien et du Bathonien (Forêt de la Joux) dans sa partie basse. Les marnes de l'Oxfordien sont également très présentes (Forêt de Levier). A partir de la Forêt du Prince et jusqu'au Risol, ces sont les calcaires du Kimméridgien et du Portlandien qui dominent.

Pentes

Les pentes sont fortement dominées par la classe 1 (0 - 5°). De rares pentes sont supérieures à 15° (localisées dans la Forêt du Prince). Les pentes moyennes se retrouvent principalement sur les altitudes les plus importantes (Risol).

Climat

La pluviométrie enregistrée est supérieure à l'isohyète 1500 mm pour le plateau de Levier jusqu'à 1800 mm pour le Risol. En janvier, inférieure à l'isotherme 0°C jusqu'à -2°C dans le Risol. En juillet, les isothermes concernés sont +16-15°C. Les grands relief de présentent une zonation marquée de leurs versants. L'hétérogénéité y est importante pour la forêt de la Joux et pour le Risol. Les versants Sud-Est reçoivent une quantité de rayonnement importante ($> 62 \text{ kW.m}^{-2}$) alors que les versants nettement nord-ouest reçoivent une énergie inférieure à 50 kW.m^{-2} (par exemple, la Forêt du Prince).

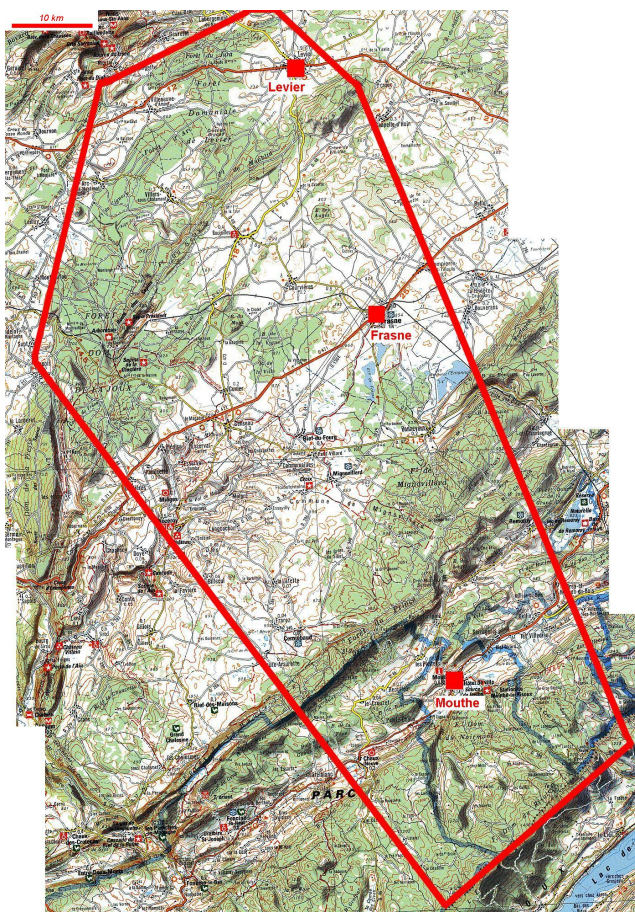


Figure 2.25. Zone de référence 1 (IGN).

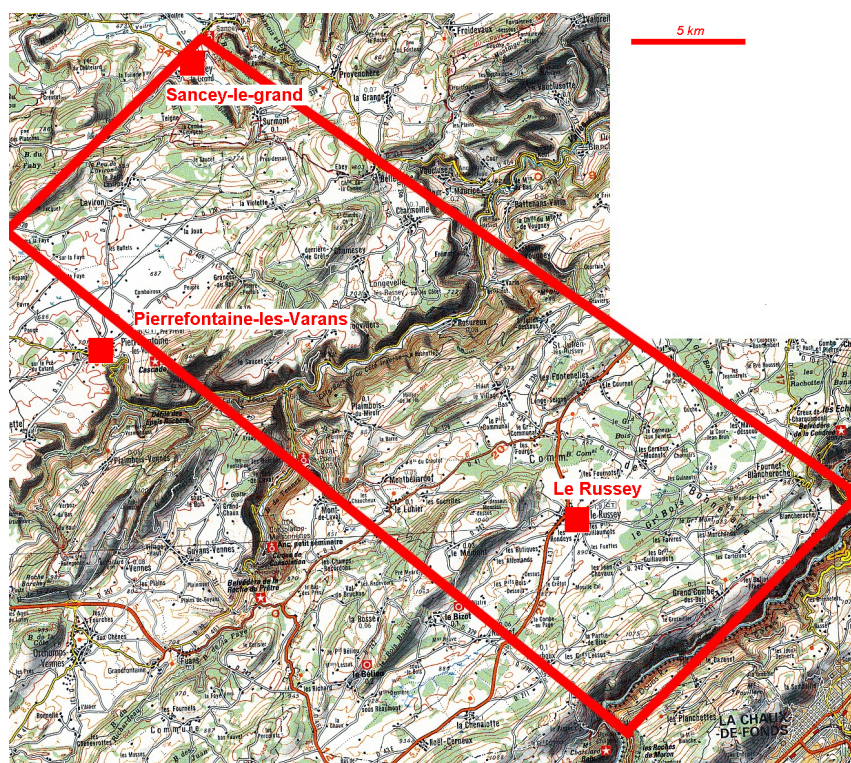


Figure 2.26. Zone de référence 2 (IGN).

5.2. Zone de référence 2 : axe Sancey-le-Grand / Pierrefontaine-les-Varans / Le Russey (partie « nord » du massif) (Figure 2.26).

Altitude

La gamme altitudinale de cette zone de référence est comprise entre 600-700 m et 1000-1100 m. Le secteur de référence est divisé en deux par les Pentes Intermédiaires qui se présentent comme un fossé (où l'altitude chute sous les 600 m). L'altitude la plus courante est comprise entre 800 et 1000 m.

Faciès géologiques

Cinq ensembles de faciès géologiques sont représentés au sein de la zone de référence 2. Il s'agit des « calcaires » (j1b / j6 / j7b / j9), du complexe « indéterminé marno-calcaires » (j1a / j2 / j8), des « marnes » (j4 / j7a), des « éboulis » (E) et des « alluvions » (Fz / FzT). Dans la partie basse de la zone, les calcaires du Bathonien dominent. Jusqu'aux Pentes Intermédiaires, un ensemble Oxfordien-Argovien, marno-calcaire, a été mis en évidence. Les fortes pentes sont occupées par des éboulis. Au delà des Pentes Intermédiaires, la diversité géologique s'étend du Séquanien (Calcaires durs et Marno-calcaires) jusqu'au Portlandien. Les forêts ont également pu se développer dans quelques dépressions tourbeuses (roches imperméables, alluvions).

Pentes

Les pentes moyennes (5 – 15°) dominent en proportion. Les fortes pentes de la vallée du Dessoubre coupent la zone de référence en deux, du nord-est au sud-ouest. De fortes pentes sont également présente à l'extrémité est (Les Gorges du Doubs), à la frontière suisse.

Climat

Les précipitations enregistrées sont habituellement supérieures à 1200 mm jusqu'aux

Pentes Intermédiaires. Sur le plateau de Maîche la pluviométrie est plus importante (1300 mm). Sur la partie orientale de la zone de référence, la pluviométrie est de 1200 mm, jusqu'aux gorges du Doubs. En janvier, la température est inférieure à l'isotherme à 0°C (-1°C pour le plateau de Maîche). En juillet, la zone de référence est coupée en deux par l'isotherme +16°C au niveau des Pentes Intermédiaires. Les fortes pentes de cette zone de référence présentent un contraste important en terme de rayonnement solaire. Leur orientation est déterminante. Au centre, les Pentes Intermédiaires sont particulièrement en cassées entraînant un rayonnement peu important sauf pour le haut du versant Nord (orienté Sud-Est). Il en est de même pour les Gorges du Doubs. Dans la partie orientale de la zone de référence, deux petits reliefs présentent une zonation marquée du rayonnement. Pour la partie la plus basse de la zone de référence, l'hétérogénéité est plus marquée et la tendance est aux faibles valeurs de rayonnement.

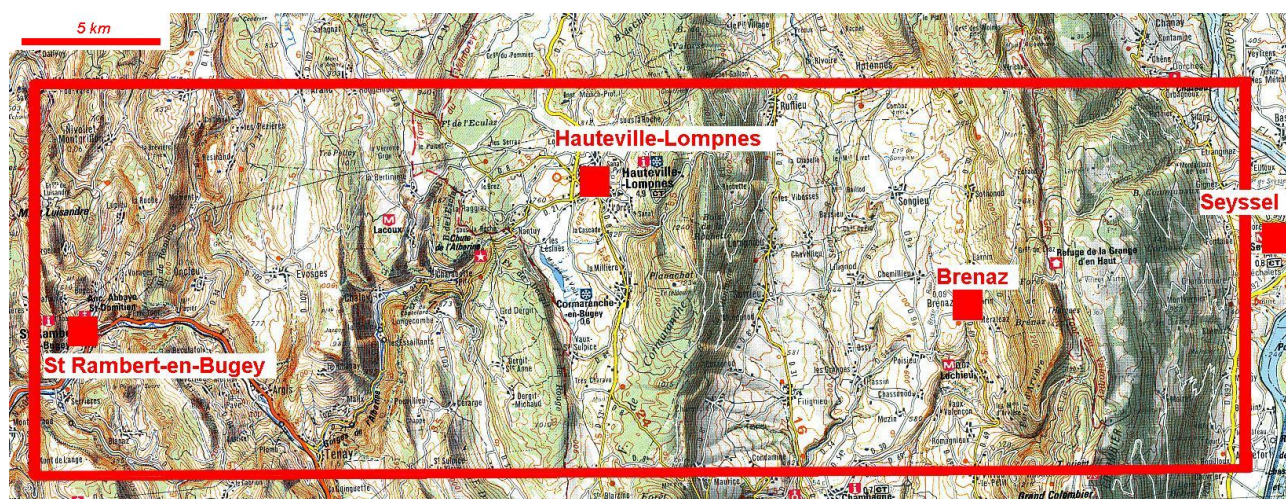


Figure 2.27. Zone de référence 3 (1/100000, IGN).

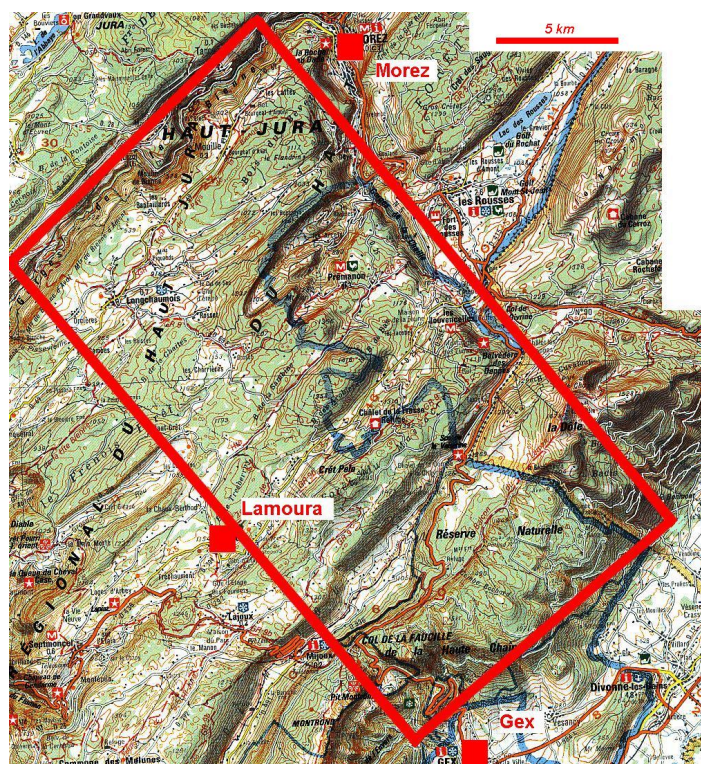


Figure 2.28. Zone de référence 4 (1/100000, IGN).

5.3. Zone de référence 3 : axe St Rambert-en-Bugey / Hauteville-Lompnès / Brenaz / Seyssel (partie « sud » du massif) (Figure 2.27).

Altitude

Les altitudes de cette zone de référence se répartissent de 600-700 m à 1500-1600 m. L'altitude générale progresse jusqu'à l'est de la zone de référence (environ 1500 m). On note la présence d'une vallée qui casse cette régularité (altitude 600-700 m), dans la partie est de la zone. L'altitude la plus courante est comprise entre 800 et 1000 m.

Faciès géologiques

La zone de référence 2 présente une diversité importante pour les étages du complexe « indifférencié marno-calcaire » (l9b / j2 / j5b / j6a / jP / n1b-2 / n3 / n1-5U). Suivent ensuite les « calcaires » (j1c / j6b / j7-8a / j8b / j9), les « marnes » (l1-5 / l7-9a), le « glaciaire » (Gx) et les « éboulis » (E). La géologie est nettement dominée par les calcaires, les ensembles marneux étant plus rares. Les pentes fortes entraînent l'accumulation d'éboulis, surtout dans la partie basse de la zone de référence. En altitude, c'est le Kimméridgien et le Portlandien qui dominent avec des bancs de calcaires épais.

Pentes

Cette zone de référence a été choisie pour ses caractéristiques topographiques et ses plissements serrés. Les pentes fortes sont majoritairement présentes sur l'ensemble de la zone. A l'inverse, les pentes faibles sont très peu représentées.

Climat (sources différentes des autres ZR)

La pluviométrie annuelle est comprise entre 1200 et 2000 mm. La zone de référence séparée en deux avec une partie ouest qui présente une pluviométrie entre 1200 et 1400 mm par an, et une partie est qui présente une pluviométrie allant jusqu'à 2000 mm par an. L'isotherme moyen annuel 8°C englobe la moitié orientale de cette zone de référence (tout comme la ZR 4). La seconde moitié est concernée par l'isotherme 10°C. L'hétérogénéité importante de la moitié ouest de cette ZR va entraîner la définition de nombreux microclimat. L'orientation plein-sud étant un atout important pour la réception de l'énergie solaire. Dans la moitié est de la zone de référence, deux grands reliefs se différencient. Les pentes plus homogènes entraînent un zonage climatique plus régulier.

5.4. Zone de référence 4 : axe Morez / Lamoura / Gex (partie centre-« sud » du massif) (Figure 2.28).

Altitude

La gamme d'altitude de la zone de référence 4 est comprise entre 800-900 m et 1400-1500 m. Le gradient altitudinal et l'altitude moyenne de cette zone de référence sont plus importants que ceux de trois autres secteurs de référence. La moitié est à une altitude supérieure à 1200 m. L'altitude la plus courante est comprise entre 1000 et 1200 m.

Faciès géologiques

Cette zone de référence présente six grands ensembles de faciès géologique : les « calcaires » (j6 / j9 / n2 / n4), le complexe « Indifférencié marno-calcaires » (j7 / j8 / jP), les « marnes » (j5-4), le « glaciaire » (Gx / Fgx), les « alluvions » (Fy) et les « éboulis » (E / Ep). Cette zone de référence présente une diversité géologique moins importante que les autres, de part sa taille plus réduite. Sa topographie plissée entraîne un affleurement des étages du Kimméridgien et du Portlandien (de j7 à j9), sous forme de bancs calcaires.

Les étages du Barrémien et Valanginien sont également présent de façon importante. Dans la partie est de la zone de référence, les éboulis recouvrent les pentes.

Pentes

Abondance des différentes classes de pentes relativement équilibrée avec une alternance pentes faibles à pentes moyennes. Cependant, l'intensité de la pente augmente avec l'altitude. Dans la partie Est de la zone de référence, les pentes sont très marquées.

Climat

Cette zone de référence est caractérisée par l'isohyète le plus élevé (2000 mm) pour sa partie orientale. Le minimum relevé est tout de même de 1800 mm. En janvier, l'isotherme concerné est -1°C, les températures y sont inférieures. En juillet, les températures appartiennent à la classe inférieure à +16°C. La forme du relief de cette zone de référence entraîne une zonation du rayonnement en d'unités parallèles (nord-est / sud-ouest). Cette zone de référence présente deux secteurs où rayonnement solaire est important ($> 62 \text{ kW.m}^{-2}$), au centre et à son extrémité est. A l'inverse, une zone bénéficiant d'un rayonnement faible, s'individualise sur le versant nord-ouest au centre de la ZR 4. Les autres secteurs présente une hétérogénéité importante.

6. Conclusion.

A travers les nombreuses études dont a fait l'objet le massif du Jura, les paramètres écologiques ont été identifiés et quantifiés. L'assemblage des mésoclimats et les diversités topographique et géologique ont été mises en évidence.

Quatre ensembles de paramètres ont été retenus pour apporter les couches d'information au futur zonage de potentialité sylvicole. Il s'agit du climat, de la géologie, de la topographie et du sol. A ses thèmes s'ajoutent les données sur peuplements forestiers de l'arc jurassien.

Les données disponibles montrent que les couches d'information sont de nature différente et demanderont un traitement préalable avant intégration au zonage.

Une lacune importante a été identifiée. La carte des propriétés des sols à l'échelle du massif est inexistante. Un protocole d'étude spécifique devra être mis en place pour l'élaboration de cette couche d'information indispensable.

L'étude des propriétés écologiques du massif constituent un point de départ dans le traitement de la problématique AOC en étoffant les connaissances déjà acquises. Les lacunes concernant la spatialisation de la couverture pédologique des massifs forestiers pourront être comblées. Ces informations pourront être intégrées au zonage de « potentialités sylvicoles ». La phase stationnelle de cette étude apportera une description et des éléments de compréhension de la variabilité des données dendrologiques à une échelle locale. Ces résultats seront indispensables à la description précise du contenu des unités de terroir. C'est à partir de quatre zones de référence décrivant la variabilité de la zone d'étude que l'homogénéité globale et l'hétérogénéité locale qui font la richesse du massif jurassien pourront être décrites.

Chapitre 3 : Phase 1 - Spatialisation des propriétés des sols forestiers du massif du Jura

1.Introduction.

L'approche développée dans le chapitre 2 a permis de découper le massif du Jura selon les propriétés écologiques ayant une influence sur la production sylvicole et en lien avec la définition d'un terroir. L'accent a été mis sur le climat, la géologie, la topographie et le sol.

La carte des propriétés des sols forestiers du massif jurassien à une échelle suffisamment locale est nécessaire pour réaliser une carte de potentialité sylvicole (Future AOC « *Bois du Jura* »), au 1/100000.

L'objectif est de connaître les variations spatiales des propriétés des sols susceptibles d'avoir une influence sur la croissance des arbres. Les données de la littérature ont permis de mettre en évidence les paramètres importants que sont la lithologie, la profondeur, la texture, la pierrosité et la réserve utile.

Le présent chapitre constitue la première phase de la démarche mise en place au cours de cette étude. Elle est un préalable à la réalisation de l'étude stationnelle puisque d'après les résultats obtenus, un ensemble de stations sera sélectionné.

De plus, la cartographie des propriétés de sols devra s'intégrer au futur zonage de potentialité sylvicole (*Figure 3.1*).

La répartition des sols est principalement influencée par les variations spatiales du climat, du substrat géologique et de la topographie. L'élaboration d'un prézonage constitue l'opération initiale de la mise en place du plan d'échantillonnage. Dans le cadre de cette étude, le prézonage constitue le « squelette » à la carte pédologique et permettre la mise en œuvre d'un protocole d'échantillonnage stratifié et hiérarchisé (*Legros, 1996*).

Des zones de référence (ZR) ont été sélectionnées en prenant en compte la variabilité altitudinale et géographique du massif. Les résultats ont été extrapolés à l'ensemble de la zone d'étude grâce à la définition du mode d'organisation des systèmes pédologiques en fonction des compartiments géologiques et de la topographie. L'échelle retenue pour cartographier l'ensemble du massif est le 1/100000 (minimum cartographique : 500 m) et le 1/50000 (minimum cartographique : 250 m) pour les zones de référence.

L'élaboration de la carte de propriétés des sols doit permettre le recensement des complexes de paramètres écologiques qui seront étudiés plus précisément à une échelle stationnelle. Le traitement des données sols a été mené dans ce sens.

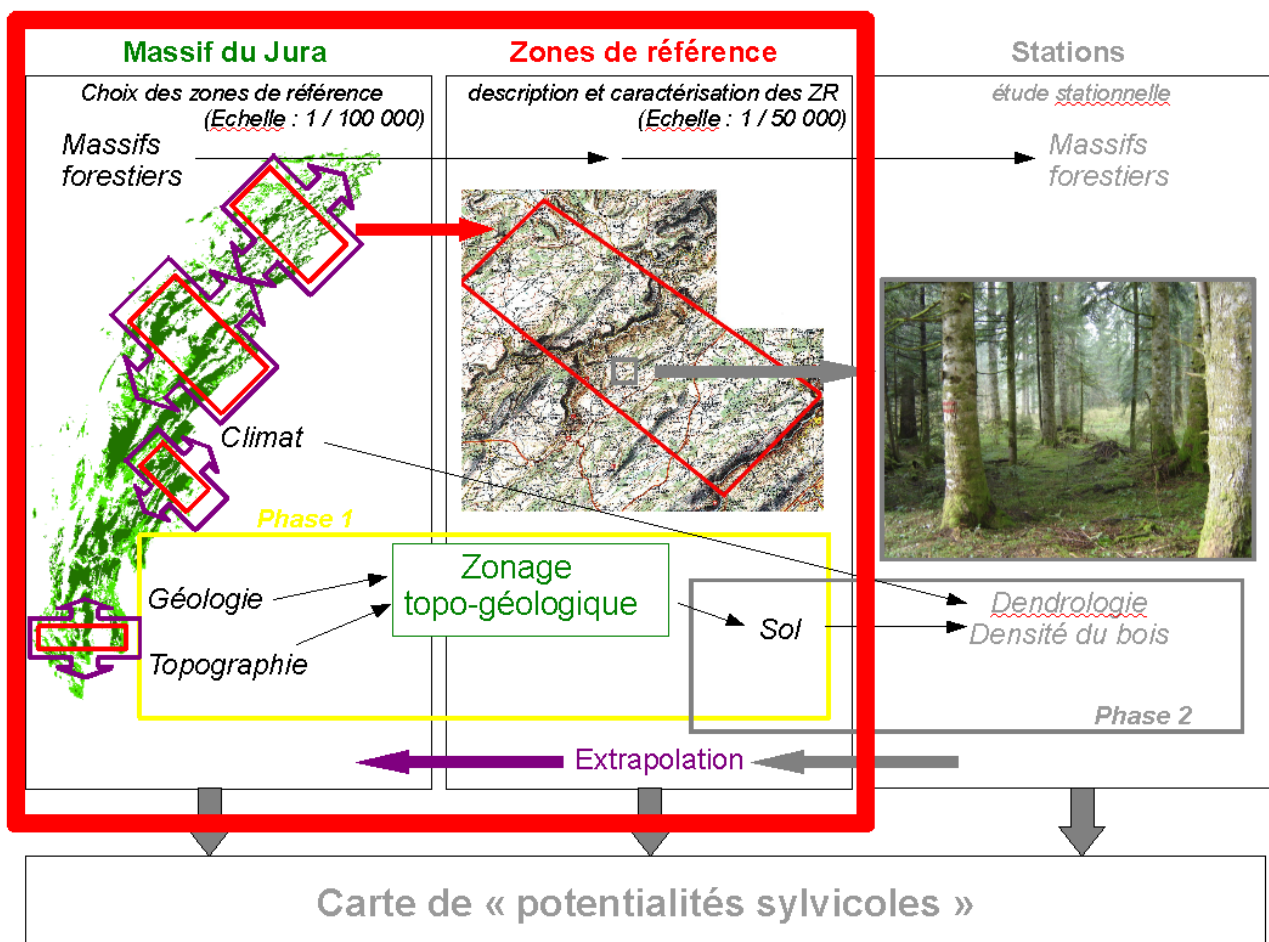


Figure 3.1. Schéma de la démarche générale, mettant l'accent sur la phase 1 de l'étude.

2. Cartographie des sols des zones de référence.

2.1. Délimitation des unités géologiques (UG).

La délimitation des compartiments géologiques est le point de départ de la démarche de cartographie des sols puisqu'il s'agit d'un facteur prépondérant de la pédogenèse. Il est nécessaire de connaître la répartition spatiale des différents étages géologiques mais également la nature du faciès de la roche mère (*Tableau 3.1*).

Cette étape s'effectue à partir du recouvrement au 1/50000 de la géologie du massif (*cf. chapitre 2*).

Il a été parfois nécessaire de vérifier le contenu, peu renseigné sur certaines cartes, et la précision des limites des unités (étages) des cartes géologiques. Il s'est agi de parcourir les zones de référence sur le terrain afin d'identifier les différents étages. La lithologie, la morphologie et la fissuration de la roche devaient être pris en compte. Il est indispensable de connaître la diversité des faciès de chaque étage géologique (*Figure 3.2*).

L'étude des notices des cartes géologiques a permis de regrouper les différents étages en sept grands types de faciès, c'est-à-dire sept unités géologiques (UG) (*cf. annexes*).

Une grille systématique a été produite suivant le minimum cartographique (pixel de 500 m

de côté) afin d'apprécier la précision des unités à numériser.



Figure 3.2. Variabilité des faciès des calcaires J7, dans le secteur de Pontarlier (25).

La numérisation a été entreprise en prenant directement en compte les regroupements par faciès géologique, défini pour l'échelle fine des zones de références.

Les choix de regroupement des étages géologiques ont été dictés par la lithologie, le faciès et le degré de drainage de la roche. Cependant, la faible représentation (en surface) de certains étages a conduit à des regroupements. Par exemple, l'unité A contenant les alluvions, les tourbes et le loess a été définie puisqu'il s'agissait d'étages géologiques peu représentés, d'âge récent, épais, acides généralement et potentiellement soumis à une hydromorphie.

La carte des unités géologiques montre que ce sont les calcaires (C) et les complexes marno-calcaires (Imc) qui sont le plus représentés. Les autres classes (E, A, G) sont beaucoup moins représentées (*Figure 3.3*). Ces derniers ensembles sont peu colonisés par la forêt.

La zone de référence 1 présente de grandes unités homogènes, correspondant aux grands massifs forestiers (forêt de la Joux, forêt du Prince, Risol). La partie la plus basse en altitude présente en majorité des unités de calcaires durs avec une exception la forêt de la Joux qui représente un ensemble homogène du complexe marno-calcaire. En altitude, les unités géologiques sont composées par le complexe marno-calcaire, parsemées d'unités sur le glaciaire (Risol).

A l'inverse de la première zone de référence, la fragmentation des espaces forestiers de la zone de référence 2 entraîne un découpage important des unités. Les unités géologiques sont de petite taille et présentent une certaine diversité : toutes les UG sont représentées exceptées Imcg. Il est intéressant de noter la présence de vastes unités sur éboulis dans la partie centrale de la zone de référence (pentes intermédiaires).

La zone de référence 3 est largement dominée par des unités calcaires, avec toutefois de nombreux éboulis dans sa partie ouest.

Par ses plissements nombreux, la zone de référence 4 présente une alternance des unités calcaires et des unités marno-calcaires.

Tableau 3.1. Regroupements des étages géologiques, d'après les types de faciès : A : alluvions, tourbe, loess ; E : éboulis, dépôts instables de pente ; G : dépôts glaciaires ; Imcg : complexe marno-calcaire-grès ; M : marnes ; Imc : complexe marno-calcaire ; C : calcaires durs.

Etages	Type	Etages	Type	Etages	Type
Fx	A	j1a	Imc	j0	C
Fy	A	j2	Imc	j1	C
Fyz	A	j2 - 3	Imc	j1a - b	C
Fz	A	j3	Imc	j1a - r	C
Fz2	A	j3a	Imc	j1aP	C
FzT	A	l6 - 5	Imc	j1b	C
LP	A	l9b - j1b	Imc	j1c	C
AC	E	j5	Imc	j1c - 2	C
C	E	j5 - 7	Imc	j2a	C
E	E	j5a - c	Imc	j2b	C
EJ	E	j5b	Imc	j5A	C
Ez	E	j5e	Imc	j5M	C
Kz et Ky	E	j6a	Imc	j6	C
R	E	j7	Imc	j6b	C
S	E	j8	Imc	j7 - 6	C
Fgya	G	j9 - 8	Imc	j7 - 8a	C
G	G	j9P	Imc	j7 - 8C	C
Gly2	G	jP	Imc	j7b	C
Gm	G	n1 - 2	Imc	j7c	C
Gx	G	n1P	Imc	j7c - d	C
Gxj	G	n3	Imc	j8a	C
Gy	G	j4	M	j8b	C
Gy2	G	j4 - 5	M	j8P	C
Gya	G	j5 - 4	M	j8R	C
Gyc	G	j7a	M	j9	C
Uy	G	l4	M	lj	C
m	Imcg	l5 - 4	M	n2	C
m1b - 2a	Imcg	l6	M	n4	C
m2	Imcg	l7 - 8	M	n4 - 5	C
n5	Imcg	n3a	M	n4 - 5U	C
				nU	C

2.2. Délimitation des unités topographiques (UT).

Grâce au modèle numérique de terrain, des unités topographiques (UT) ont été délimitées d'après la pente (*Figure 3.4*). Le modèle numérique est un ensemble de pixels portant individuellement une valeur de pente. Ces valeurs ont été triées selon trois classes de pente : 0°-5° (1), 5°-15° (2), 15°-90° (3) (*cf. chapitre 2*). Chaque unité a été délimitée en suivant l'ensemble des pixels voisins d'une même classe.

La zone de référence 1 présente les pentes les moins marquées. Leur intensité augmente avec l'altitude tout en restant majoritairement moyenne (classe 2).

La zone de référence 2 est séparée en deux par un secteur présentant des pentes fortes (classe 3) : les Pentes Intermédiaires. De plus, ces pentes très marquées se retrouvent sur la partie est correspondant à la vallée du Doubs.

Les zones de référence 3 et 4 présentent une proportion de pentes fortes (classe 3) importante. Cela correspond à la topographie plissée de la Haute-Chaîne.

2.3. Délimitation des unités pédologiques : les unités topo-géologiques (UTG).

La délimitation des unités pédologiques d'après des critères topo-géologiques. Ceci correspond au prézonage de la carte pédologique, est issue des deux couches d'information précédentes (UG+UT) (*Figure 3.5*). La superposition de ces données a permis de délimiter 21 unités topo-géologiques (UTG). Les unités géologiques ont servi de base puis elles ont été subdivisées en fonction des unités topographiques présentes. A chaque faciès géologique correspond trois intensités de pentes. Cependant, sur le terrain, toutes les situations ne pas présentes. De plus, le passage à l'échelle du massif, les plus petites unités ont disparu.

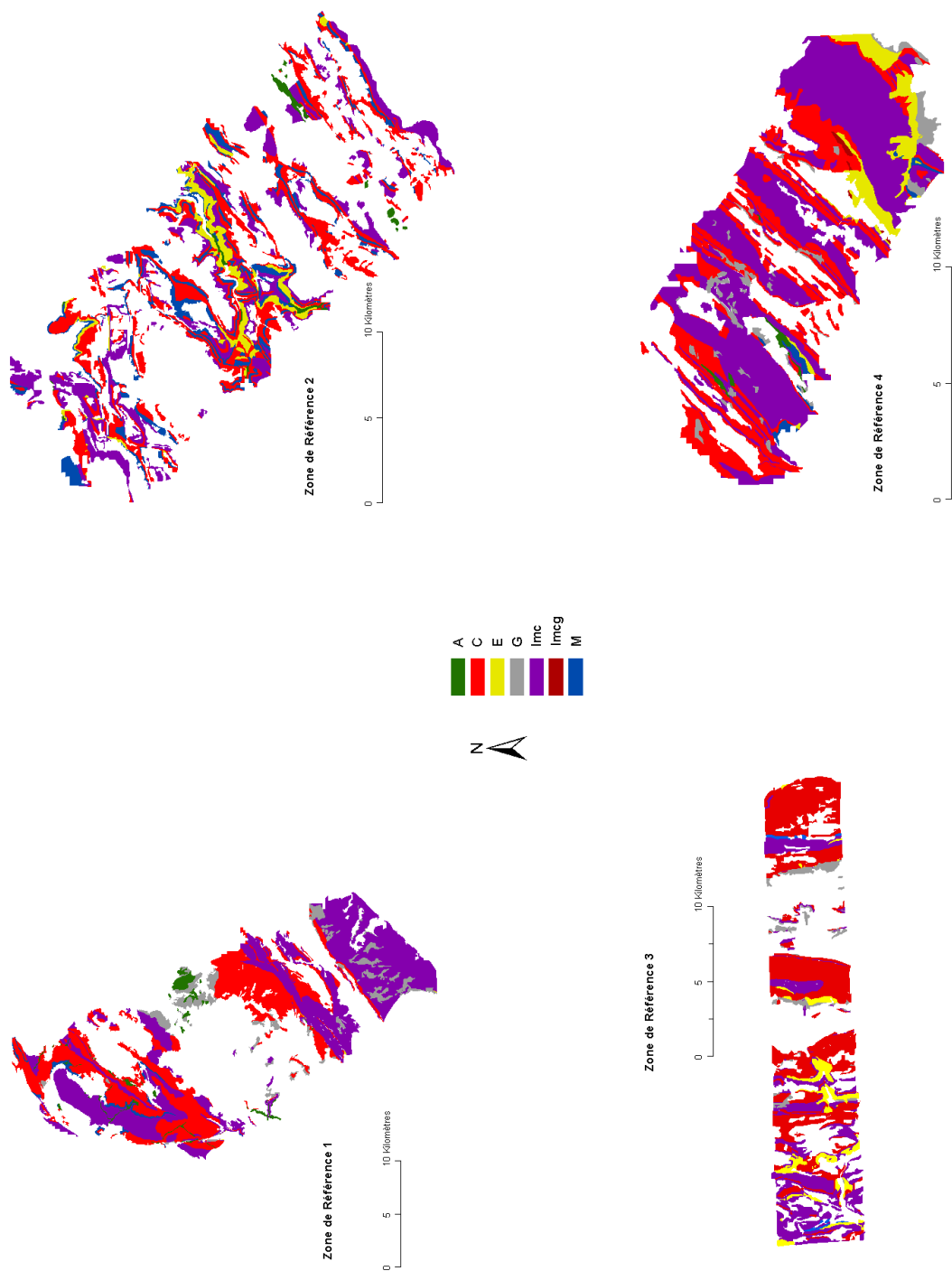


Figure 3.3. Cartes des unités géologiques des zones de référence.

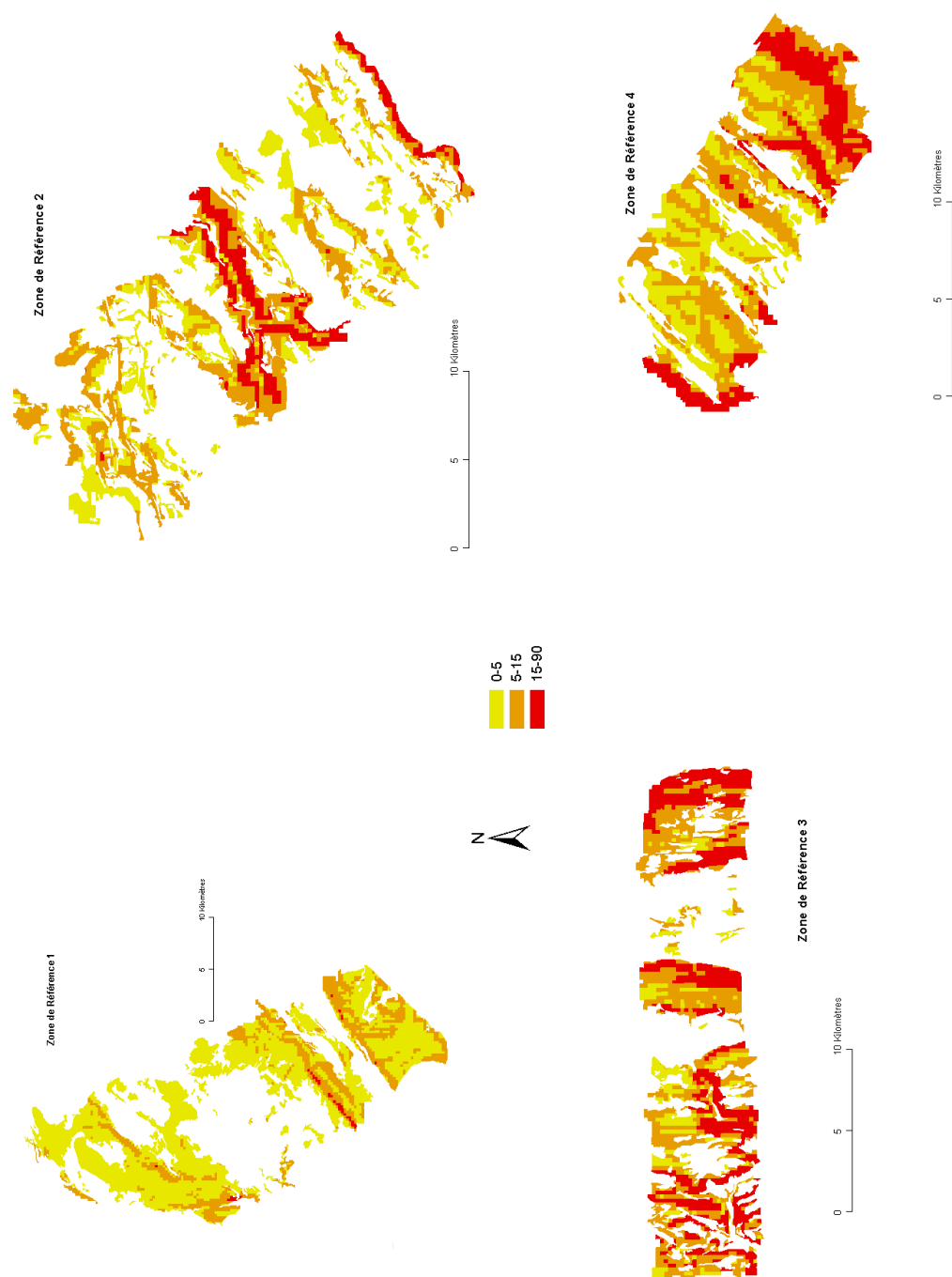


Figure 3.4. Cartes des unités topographiques des zones de référence.

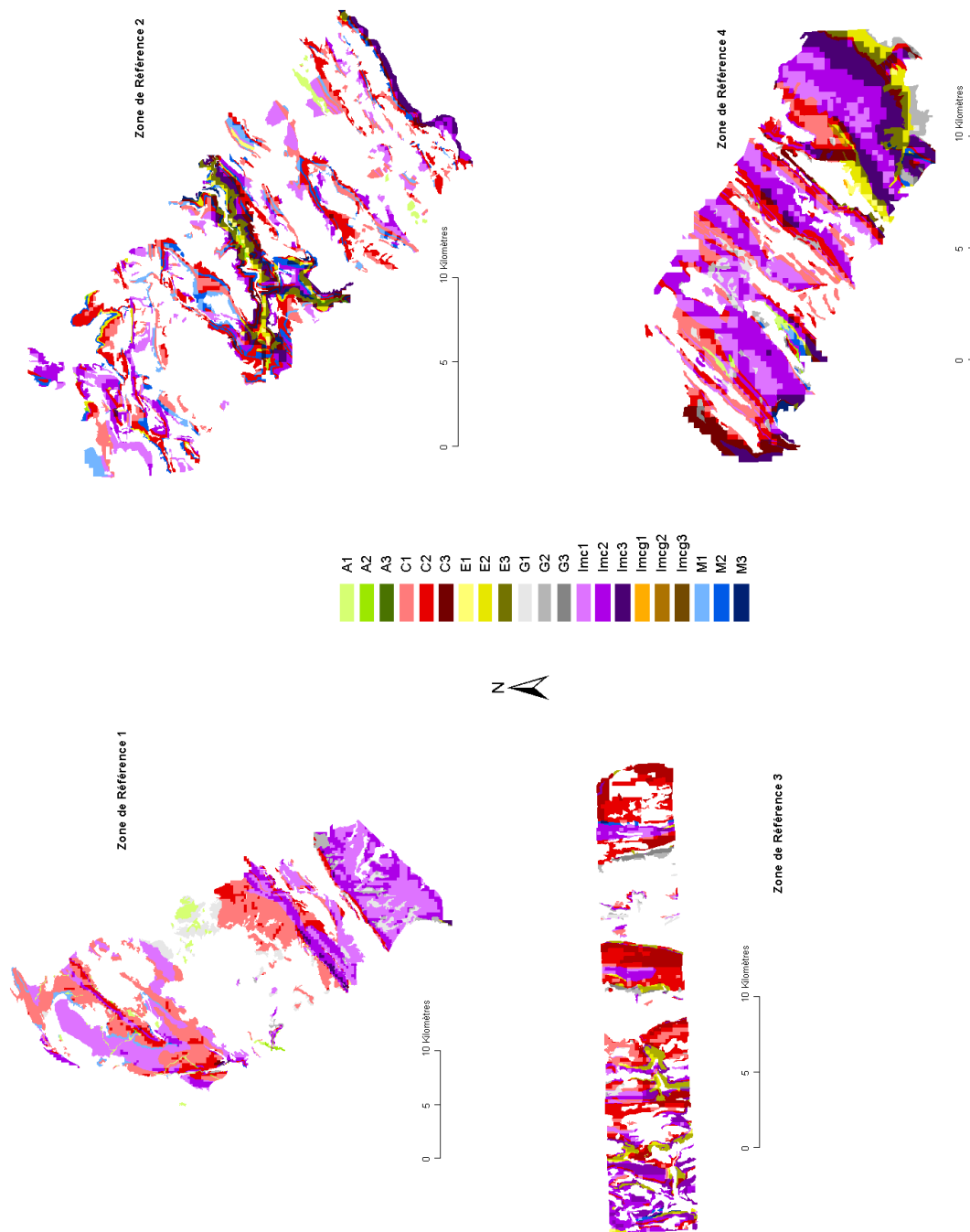


Figure 3.5. Cartes des unités topo-géologiques (UTG) des zones de référence.

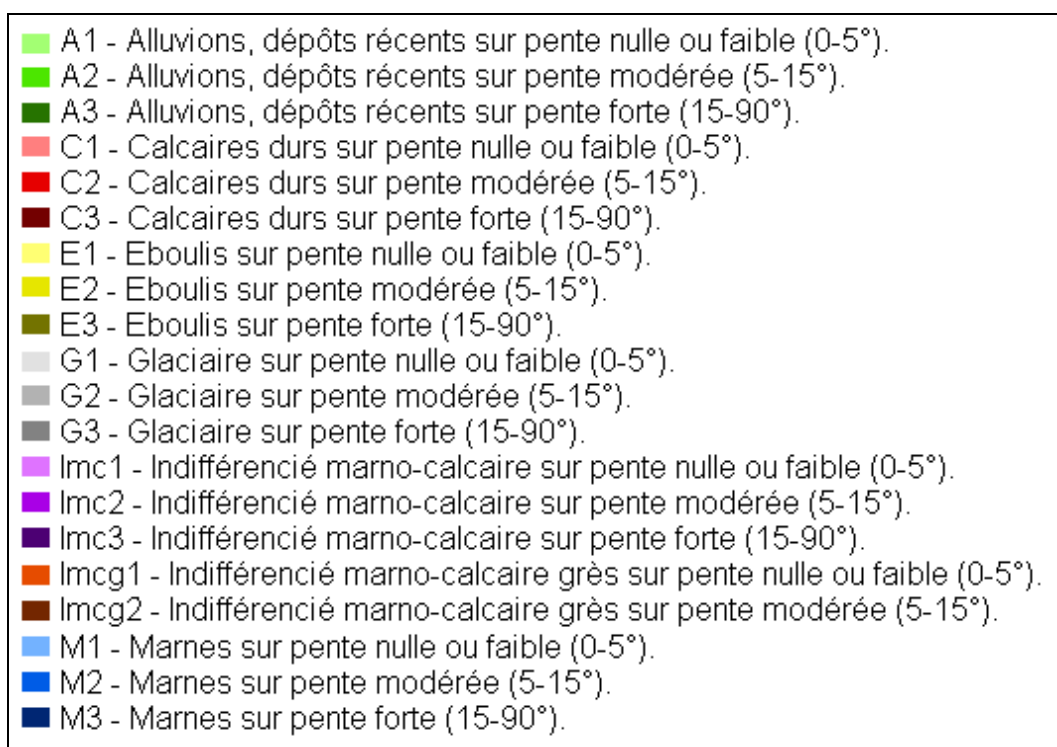


Figure 3.6. Légende des unités topo-géologiques (UTG).

Cette couche d'information présente un niveau de précision supérieur par rapport aux couches précédentes. Les grands ensembles géologiques se retrouvent sous-compartimentés par ajout de la donnée « pente » (Figure 3.6).

Lorsque la pente s'accroît, elle se trouve souvent associée à un faciès complexe marno-calcaire. Plusieurs étages géologiques avec des faciès différents sont englobés dans un seul pixel. Il s'agit de la conséquence du choix de l'échelle de travail.

2.4. Contenu des unités pédologiques.

2.4.1. Méthode d'échantillonnage.

Étant donnée la superficie de la zone d'étude et la variabilité des propriétés des sols, la méthode retenue pour décrire les unités topo-géologiques est celle du transect. L'objectif est de décrire la diversité et l'abondance des sols dans chaque type d'unité définie par le prézonage.

Les transects ont été implantés à l'intérieur des grandes unités délimitées d'après les critères géologiques et topographiques. L'échelle employée a été le 1/25000 (minimum cartographique : 125 m). La longueur maximale de chaque transect a été fixée à 500 m avec une direction parallèle à l'axe de la plus grande pente (Figures 3.7 et 3.8).

Lors de la progression le long du transect, la localisation des changements probables de caractéristiques des sols a été relevée (modification d'occupation du sol, de végétation, de pente ou de couleur de la surface du sol) et un sondage à la tarière a été réalisé. Lorsque aucun changement n'a été relevé le long du transect, des sondages ont été réalisés tous les 50 m afin d'en vérifier l'homogénéité.

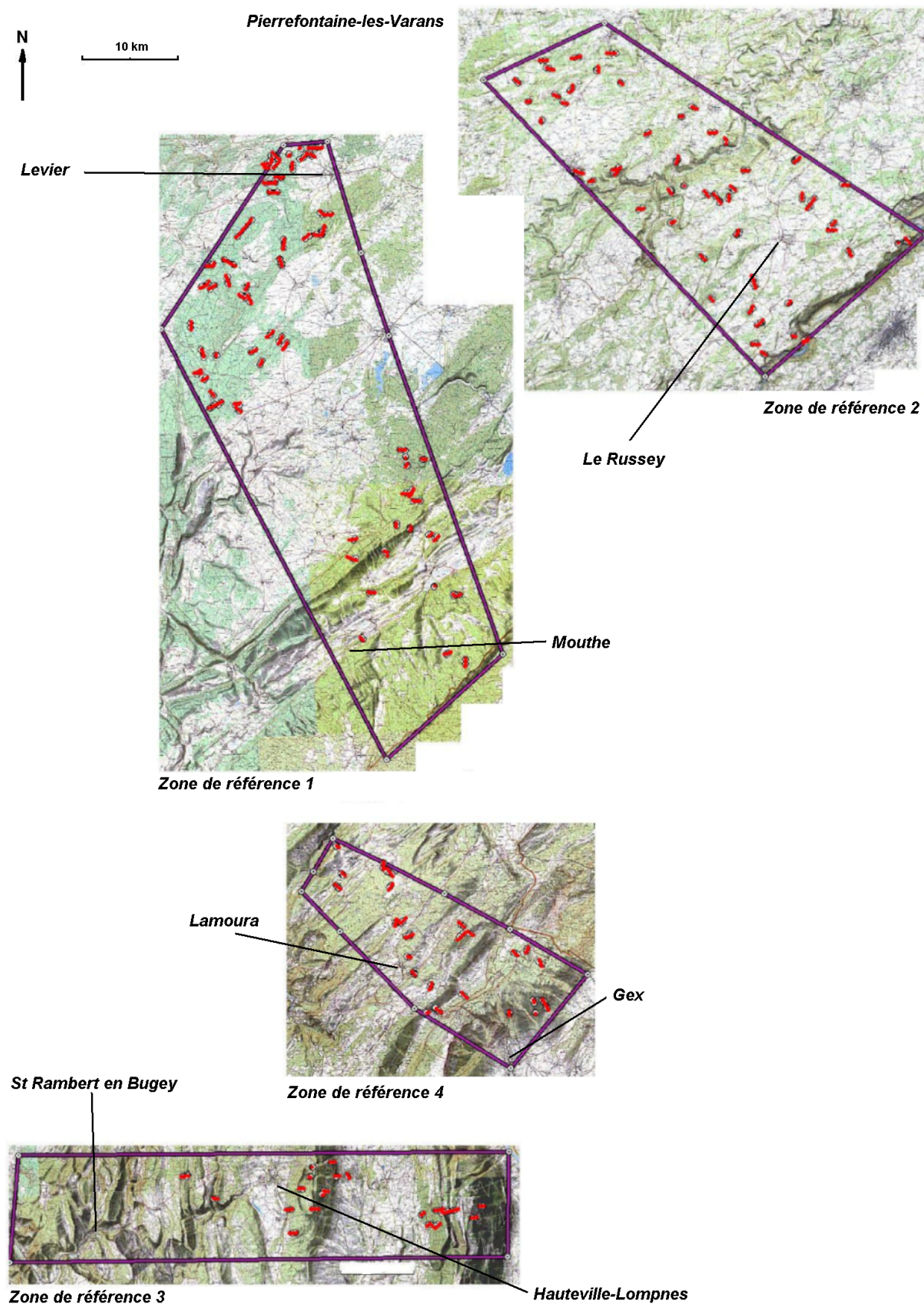


Figure 3.7. Cartes de localisation des transects au sein des zones de référence.

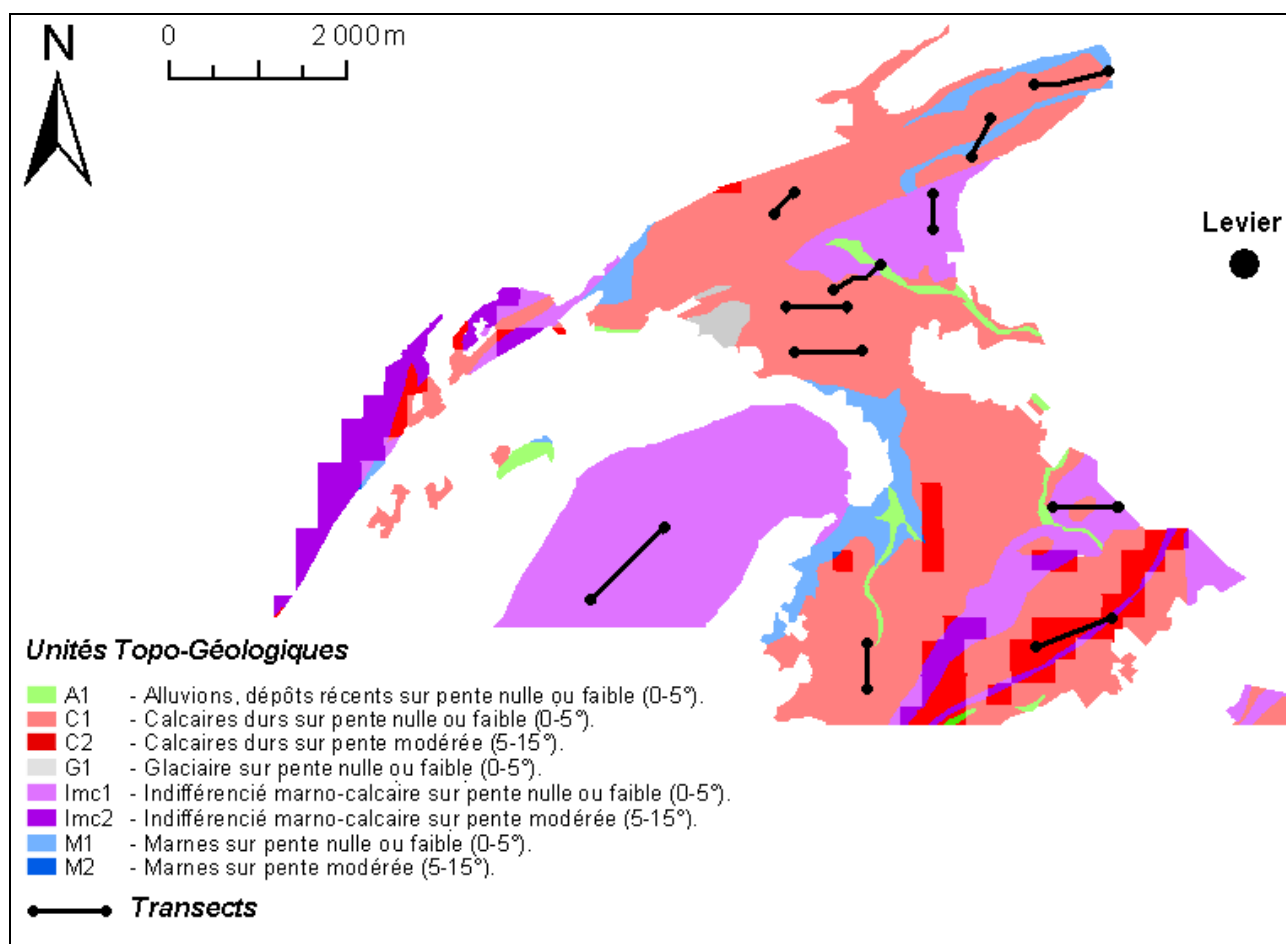


Figure 3.8. Exemple de localisation des transects au sein des unités topo-géologiques.

2.4.2. Description des sols.

Le choix des descripteurs des sols a tenu compte des exigences écologiques des arbres, des paramètres qui influencent l'enracinement, l'alimentation en eau, la nutrition. Une méthode de désignation synthétique des sols a été utilisée : le sigle morpho-édaphique mis au point par Bruckert (1989) puis modifié par Lucot (1994, 1995 et 2007). Initialement, ce sigle s'applique aux sols agricoles, mais il a été adapté pour les sols forestiers. Des éléments ont été intégrés : le système de pente, la présence ou l'absence des lapiaz et des blocs en surface, la précision de profondeur des obstacles, et la texture de tous les horizons (Figure 3.9). Chaque paramètre du sigle qui change permet de différencier deux sols décrits. L'objectif est la description du plus grand nombre possible de sigles morpho-édaphiques afin de mettre en évidence la diversité pédologique de cette zone d'étude. Ensuite, la définition du contenu des unités cartographiques sera le fruit d'un regroupement des sigles en fonction des paramètres, répartis en classes.

La description des sols a été réalisée après prélèvement de 1 m de sol lorsque cela est possible (*fiche de terrain, en annexes*).

Les paramètres de situation ont été relevés (pente, position dans le relief et topographique) ainsi que les caractéristiques du peuplement : espèces, mode de gestion. L'humus a été décrit selon l'épaisseur des trois couches : litière, fragmentation et humification.

Les horizons du sol ont été décrits de façon individuelle. Les paramètres relevés sont

l'épaisseur, la couleur, le taux de matière organique, la texture, la structure, la porosité, l'effervescence ainsi que la présence de débris organiques, de tâches d'oxydo-réduction, d'éléments grossiers, d'activité biologique et d'une pellicule calcaire. La nature et l'intensité de l'obstacle ont également été relevées (Figure 9).

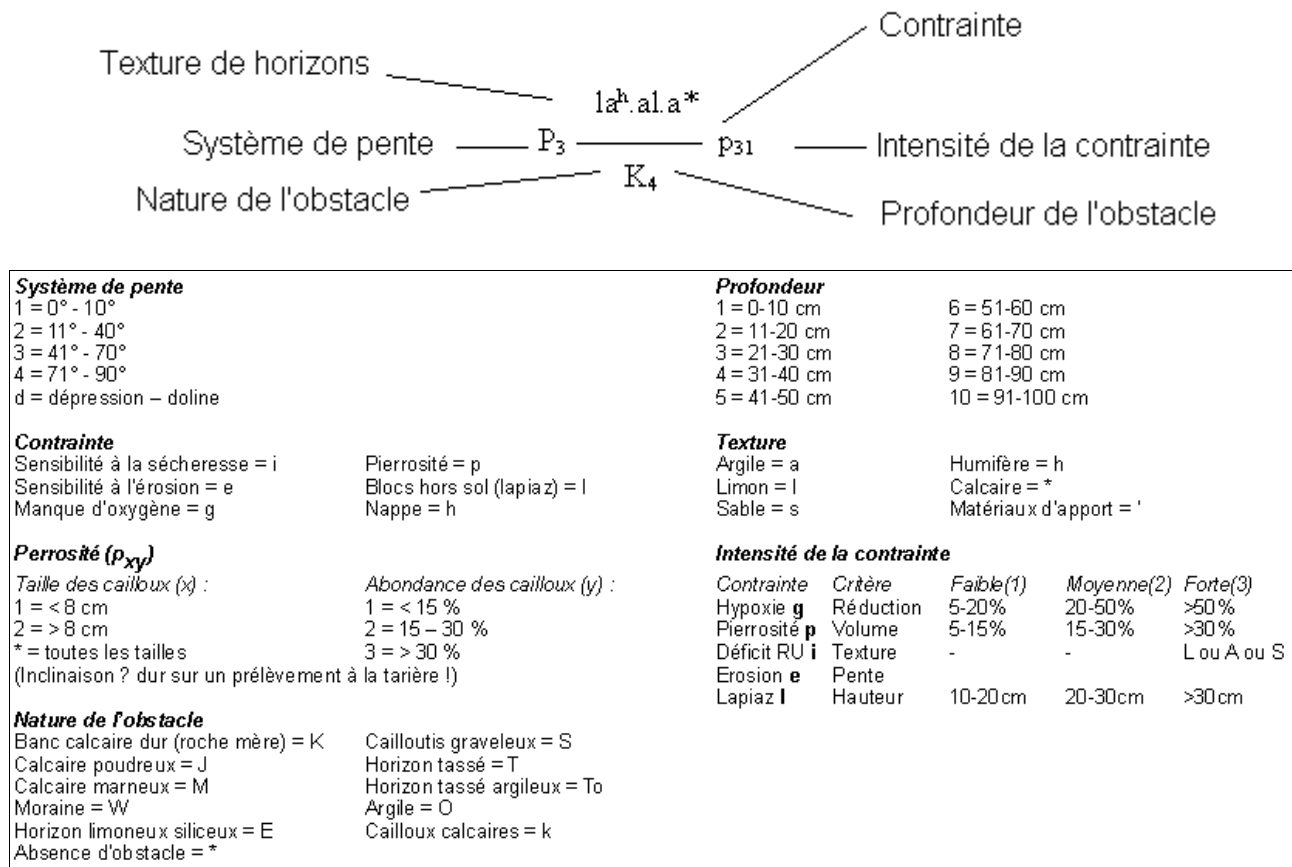


Figure 3.9. Sigle morpho-édaphique adapté (d'après Bruckert, 1989 ; Lucot, 1994, 1995, 2007) et descripteur stationnel avec contraintes associées.

Lors de la description du sol, l'acide chlorhydrique a été utilisée pour vérifier la présence de carbonates dans la terre fine et les éléments grossiers. La couleur des horizons a été décrite grâce à un code couleur standardisé (Eijkelkamp - Revised Standard Soil Color Charts). La pente a été mesurée en degrés, à l'aide d'un clinomètre.

2.4.3. Analyse des transects.

2.4.3.1. Analyse des distances.

L'UTG sur calcaire (C) a été échantillonnée plus fréquemment puisqu'il s'agit d'une unité très représentée au sein des zones de référence. Le nombre de sigles décrivant cette unité est donc important (58 pour la ZR 1). Les UTG sur éboulis (E), alluvions (A), glaciaire (G) et sur complexe marno-calcaire-grès (Imcg) sont moins représentées en surface donc l'échantillonnage y a été moins important. Ces UTG présente également une certaine homogénéité avec un nombre faible de sigles morpho-édaphiques différents. Les UTG sur marnes (M) présentent une diversité plus importante (32 sigles) mais qui reste peu

importante par rapport au complexe marno-calcaire (116 sigles). Cela s'explique par la présence la présence de sigles à la fois proche des calcaires durs (C) et des roches marneuses (M). La pente a une influence sur le nombre de sigles pour une UTG donnée.

Tableau 3.2. Nombre de sigles (nbre. sigles), distance totale parcourue (m) (dist. totale UTG) et pourcentage de distance (%UTG/ZR) par unité topo-géologique (UTG) et par zone de référence (ZR) (cf. légende : Figure 3.6).

UTG	ZR	Nbre. Sigles	Dist. Totale UTG (m)	% UTG / ZR (Distance)
C1	1	58	11779	55
C2	1	10	913	4
G2	1	1	1	0
lmc1	1	37	5461	26
lmc2	1	17	1750	8
M1	1	5	1369	6
A1	2	1	300	3
C1	2	19	2158	20
C2	2	13	1483	14
C3	2	4	341	3
E1	2	3	250	2
E2	2	2	152	1
lmc1	2	19	1772	17
lmc2	2	14	1753	17
lmc3	2	2	105	1
M1	2	15	1210	11
M2	2	10	945	9
M3	2	2	123	1
C1	3	1	119	3
C2	3	11	1035	28
C3	3	8	1346	36
E3	3	2	420	11
G2	3	2	127	3
lmc1	3	2	80	2
lmc2	3	10	586	16
C1	4	14	1420	38
C2	4	5	322	9
C3	4	5	330	9
E3	4	1	100	3
lmc1	4	4	363	10
lmc2	4	9	886	24
lmc3	4	2	301	8
lmcg1	4	1	1	0

La variabilité décroît alors que les pentes s'accroissent. Pour les unités sur calcaires (C) le nombre de sigles diminue de 92 pour les pentes faibles, à 39 pour les pentes moyennes et à 13 pour les pentes fortes. Pour les unités sur le complexe marno-calcaire, le nombre de sigles passe de 64 pour les pentes faibles, à 50 pour les pentes moyennes puis à 4 pour les pentes fortes. La contrainte que constitue la pente, empêche la diversification des sols.

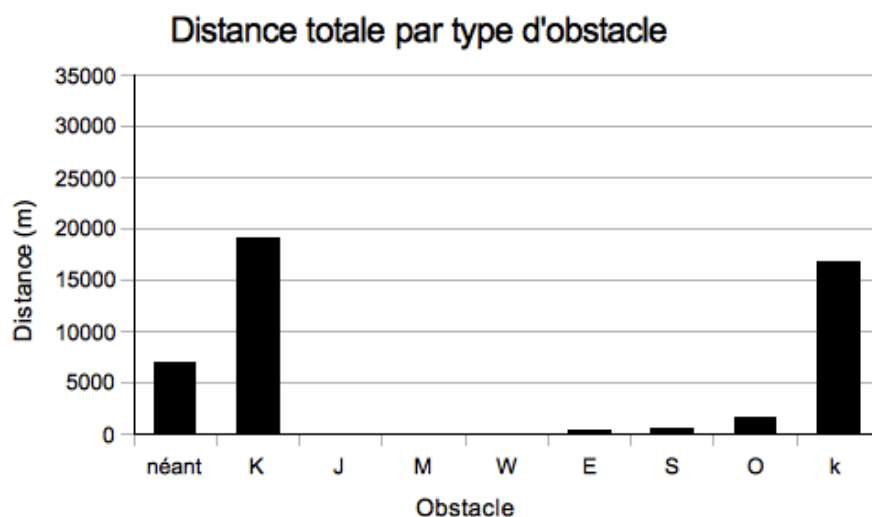


Figure 3.10. Distance totale (m) par obstacle (cf. Figure 9) (néant = absence d'obstacle, K = banc calcaire dur, J = calcaire poudreux, M = calcaire marneux, W = moraine, E = horizon limoneux siliceux, S = cailloutis graveleux, O = argile, k = cailloux calcaires).

Les obstacles rencontrés sont principalement de types calcaires (banc ou cailloutis). L'absence d'obstacle est importante, en troisième position derrière les deux obstacles « calcaires ». Les autres types d'obstacles sont représentés de façon anecdotique (Figure 3.10).

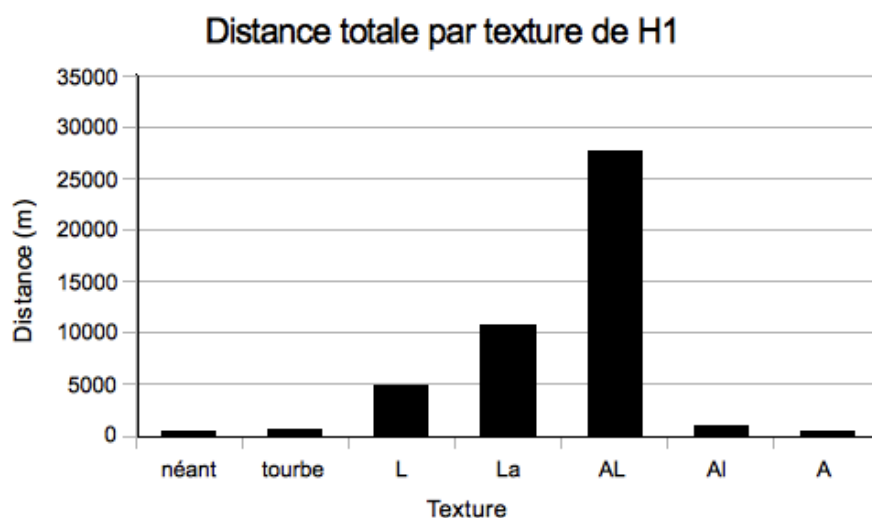


Figure 3.11. Distance totale (m) par texture de l'horizon 1 (H1) (néant = horizon 1 non observé, L = limoneux, La = limono-argileux, AL = texture équilibrée, AI = argilo-limoneux, A = argileux).

La texture équilibrée AL est la plus représentée dans le premier horizon du sol. Les textures limoneuses à faiblement argileuses sont également représentées. Les autres textures sont très faiblement représentées (Figure 3.11).

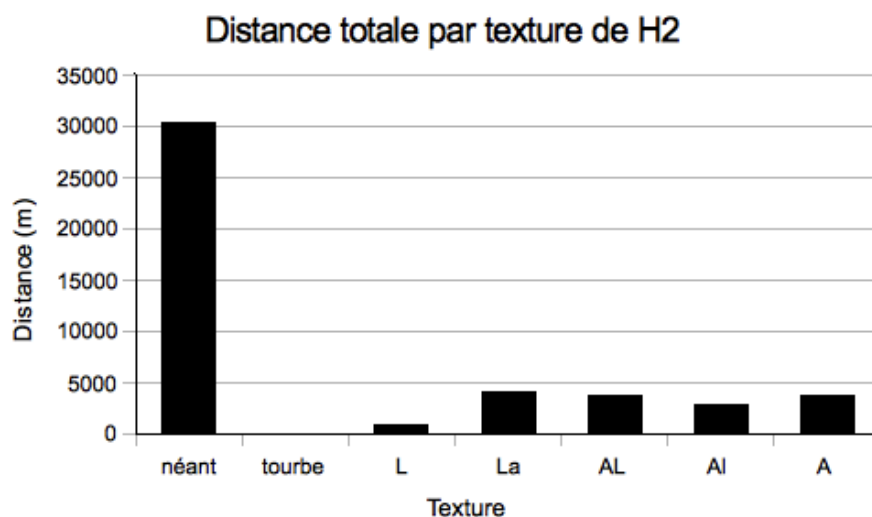


Figure 3.12. Distance totale (m) par texture de l'horizon 2 (H2) (néant = horizon 1 non observé, L = limoneux, La = limono-argileux, AL = texture équilibrée, AI = argilo-limoneux, A = argileux).

Dans la majeure partie des cas, l'information sur le 2^{ème} horizon est absente, soit il n'a pas été décrit en raison de l'abondance des éléments grossiers, soit le sol ne comporte qu'un seul horizon (sols humocalciques, rendzines). Pour les sols comportant un horizon 2, leur texture est représentée dans les mêmes ordre de grandeur. La texture limoneuse de l'horizon 2 est moins couramment trouvée (Figure 3.12).

2.4.3.2. Tris et regroupements des sigles morpho-édaphiques.

Suite à l'échantillonnage et à la collecte de données sur les transects, 523 sigles ont été décrits sur les quatre zones de référence. Après les tris et les regroupements par zone de référence et par UTG, 444 sigles ont été conservés. Les sigles ont ensuite été groupés en quatre classes de profondeur (0-30 cm, 40-60 cm, 70-90 cm, >100 cm). Cette opération a abouti à 382 sigles. La prise en compte de la taille des lapiez (lapiez de 0 à 30 cm et lapiez supérieurs à 30 cm) a permis de sélectionner 376 sigles. Le dernier tri a été effectué en tenant compte de la texture dominante du sondage et le type de l'obstacle. Au final, 109 sigles ont été conservés. Ils se répartissent sur 33 UTG au sein des 4 zones de référence.

Les contraintes relevées par les sigles n'ont pas été prises en compte dans les tris mais elles constituent une information complémentaire plus précise qui peut être utile pour l'interprétation.

Cette zone de référence est représentée majoritairement par des faciès calcaires ou marno-calcaires (Tableau 3.3). Les sigles décrits sont toutefois très diversifiés en terme de profondeur comme en terme de texture. Les sols à texture limoneuse sont présents de façon récurrente. Cependant, le sol le plus courant pour les UTG sur calcaire dur (C) et sur le complexe marno-calcaire (Imc) est un sol à texture équilibrée, superficiel et contraint par un banc ou des cailloux calcaires.

Tableau 3.3. Diversité de sigles morpho-édaphiques par UTG dans la zone de référence 1.

Zone de Référence 1

UTG	Sigle morpho-édaphique	Contrainte	% sigle / UTG (Distance)
C1	*/K/superf	* p	1
C1	A*/superf(1)-moy(2)		3
C1	A/K/superf(19)-moy(1)/humif		19
C1	AL/K/superf(29)-moy(1)-prof(1)	* p	31
C1	A/O/superf	* g	1
C1	AL/O/superf		1
C1	L*/moy(10)-prof(4)-tres prof(3)	* g	17
C1	L/K/superf(13)-moy(6)-prof(<1)/humif(4)	* p l	20
C1	L/S/superf(<1)-moy(<1)		1
C1	L/O/superf(3)-moy(3)		6
C2	AL*/prof		7
C2	AL/K/superf(13)-moy(12)	* p	24
C2	A/K/superf/humif	* p	22
C2	L*/prof	* l	22
C2	L/K/superf	* p	25
G2	A/K/superf/humif	* p	
lmc1	*/K/superf	* l	3
lmc1	AL*/		1
lmc1	AL/K/superf(45)-moy(3)	* p l	45
lmc1	A*/prof/humif		1
lmc1	A/K/superf/humif	* p l	18
lmc1	L/O/superf(1)-moy(1)		3
lmc1	L*/prof		1
lmc1	L/E/superf		2
lmc1	L/K/superf(20)-moy(6)-prof(1)	* p l	26
lmc2	*/K/superf	* l	5
lmc2	AL/K/superf(38)-moy(2)	* p	39
lmc2	A*/très prof/humif	* g	3
lmc2	A/K/superf/humif	* pl	38
lmc2	L*/superf		3
lmc2	L/K/superf(4)-moy(8)/humif(3)	* p	12
M1	A*/moy		78
M1	AL/S/prof		8
M1	AL/K/superf		10
M1	L/K/superf	* p	4

**Tableau 3.4. Diversité de sigles morpho-édaphiques par UTG
dans la zone de référence 2.**

Zone de Référence 2

UTG	Sigle morpho-édaphique	Contrainte	% sigle / UTG (Distance)
A1	T/*/très profond	* h	100
C1	AL/K/superf(31)-moy(4)	* p	35
C1	A/K/superf/humif	* p l	20
C1	L/E/superficiel	* p	11
C1	L/*/moy(10)-prof(2)-très prof(2)		13
C1	L/K/superf(10)-moy(11)	* p	21
C2	AL/K/superf	* p	6
C2	A/K/superf/humif		27
C2	L/K/superf(15)-moy(8)-prof(33)/humif(28)	* p l	55
C2	L/*/prof/humif		12
C3	AL/K/superficiel	* p(13)	22
C3	A/K/superficiel/humif	* p et l (7)	78
E1	AL/K/superficiel	* p qd k	44
E1	A/K/superficiel/humif	* p qd k	56
E2	A/K/superficiel/humif	* p qd k, l	100
lmc1	AL/O/moy		3
lmc1	AL/*/moy		3
lmc1	AL/K/superf	* p	10
lmc1	AL/S/superf		5
lmc1	A/K/superf	* p l	11
lmc1	L/J/moy		5
lmc1	L/*/moy(7)-prof(10)		17
lmc1	L/K/superf(32)-moy(14)	* p g	46
lmc2	AL/K/superficiel(55)-moyen(7)	* p qd k, l	62
lmc2	L/*/profond	* néant	16
lmc2	A/K/superficiel/humif	* p qd k	22
lmc3	A/K/superficiel(69)-moyen(31)/humif	* p	100
M1	AL/S/prof	* g	5
M1	AL/K/superf		3
M1	A/*/prof(17)-très prof(8)/humif	* g h	25
M1	A/K/superf/humif	* p l	5
M1	L/S/prof	* g	4
M1	L/*/moy(21)-très prof(6)	* g	26
M1	L/K/superf(10)-moyen(10)	* l	20
M1	L/O/superf(4)-prof(8)	* g	12
M2	AL/K/sup(15)-moy(11)	* p(6)	25
M2	AL/O/sup		10
M2	A/K/sup(10)-moy(5)/humif	* p l	16
M2	L/*/sup(3)-prof(7)	* g(7)	9
M2	L/K/moyen		14
M2	Th/*/très profond	* h	26
M3	Al/K/superficiel/humif	* l(70)	100

Cette zone de référence présente une grande diversité d'UTG et de sigles (*Tableau 3.4*). L'UTG sur alluvions, qui a été échantillonnée, présente une grande homogénéité avec un sol tourbeux. Les pentes intermédiaires présentent des UTG sur éboulis avec des sigles superficiels à texture argileuse et souvent humifères. L'accentuation de la pente entraîne une baisse de la diversité des sigles morpho-édaphiques et l'augmentation du taux d'argile dans les textures.

Tableau 3.5. Diversité de sigles morpho-édaphiques par UTG dans la zone de référence 3.

Zone de Référence 3			
UTG	Sigle morpho-édaphique	Contrainte	% sigle / UTG (Distance)
C1	AL/K/superficiel		85
C1	A/K/superficiel/humif		15
C2	AL/K/superficiel(7)-moyen(4)	* g ; p qd k	11
C2	A*/superficiel/humif	* g	5
C2	A/K/superficiel/humif	* p qd k, l	60
C2	L/K/superficiel	* l surtout	24
C3	AL/K/superficiel		19
C3	A/K/superficiel/humif	* p; rares l ou néant	81
E3	A/K/superficiel	* p qd k	36
E3	L/K/superficiel	* p qd k	64
G2	AL/K/superficiel	* p qd k	30
G2	A/K/superficiel	* p qd k	70
lmc1	A/M/superficiel		14
lmc1	A/K/superficiel/humif	* p qd k	86
lmc2	A/O/superficiel(12)-moyen(20)	* g	31
lmc2	AL/K/superficiel	* l ou p ou néant	32
lmc2	A/K/superficiel		33
lmc2	L/K/moyen		4

Cette zone de référence présente des sols principalement superficiels (*Tableau 3.5*). L'obstacle majeur rencontré est calcaire (en bancs ou en cailloutis). La texture dominante est argilo-limoneuse à argileuse. Des sols à texture limoneuse se retrouvent dans l'UTG à éboulis sur pentes fortes mais également, en moins grande proportion sur les calcaires en pentes moyennes (Classes 2). Les sols de cette zone de référence sont majoritairement contraints par une pierrosité importante.

Les sols de la zone de référence 4 sont majoritairement superficiels et humifères (*Tableau 3.6*). L'obstacle récurrent est le calcaire en bancs ou en cailloutis. La pierrosité est une contrainte très courante. Les lapiez sont présents dans de nombreuses unités. La texture dominante est argileuse. Les horizons à texture limoneuse arrivent en second en terme de proportion.

Tableau 3.6. Diversité de sigles morpho-édaphiques par UTG dans la zone de référence 4.

Zone de Référence 4			
UTG	Sigle morpho-édaphique	Contrainte	% sigle / UTG (Distance)
C1	A/K/superficiel/humif	* p qd k, l	60
C1	L/K/superficiel(37)-moyen(2)/humif(31)	* p qd k, l	39
C1	L/S/moyen		1
C2	A/K/superficiel/humif	* p qd k, l	71
C2	L/K/superficiel(21)-moyen(9)/humif	* p qd k	29
C3	A/K/superficiel/humif	* p qd k	100
E3	A/K/superficiel/humif	* p qd k	100
lmc1	A/K/superficiel(91)-moyen(9)/humif	* p qd k, l	100
lmc2	*/K/superficiel	* p et l	13
lmc2	AL/K/superficiel	* p qd k	11
lmc2	A/K/superficiel/humif	* p qd k ou l	70
lmc2	L/K/superficiel	* p	6
lmc3	A/K/superficiel/humif	* p qd k	100
lmcg1	A/W/moyen		100

Tableau 3.7. Différences de profondeur et de diversité entre les quatre zones de référence (prof. min. : profondeur minimale, prof. moy. : profondeur moyenne, prof. max. : profondeur maximale, dist. totale : distance parcourue au sein d'une zone de référence , nbre. sigles : nombre de sigles décrits par zone de référence).

	prof. min. (cm)	prof. moy. (cm)	prof. max. (cm)	dist. totale (m)	nbre. sigles
ZR1	0	33	> 100	21273 (54%)	128 (41%)
ZR2	0	35	> 100	10592 (27%)	104 (34%)
ZR3	0	18	40	3713 (9%)	36 (12%)
ZR4	0	16	50	3723 (9%)	41 (13%)

Le tableau 7 montre que la zone de référence 1 représente 50% de l'effort d'échantillonnage : sa « distance » totale correspond à 54% de la distance totale échantillonnée. Les zones de référence du sud du massif occupent chacune 10% de la distance. Le nombre de sigles décrit dans chacune des zones de référence correspond à la distance totale parcourue, avec une diversité légèrement supérieure pour la zone de référence 2. Si la minimale des sols échantillonnés est identique pour les quatre zones de référence (0 cm), les zones 1 et 2 présentent des profondeurs maximales supérieures à 1 m. Les zones 3 et 4 montrent des profondeurs maximales deux fois inférieures (40 et 50 cm). Ces résultats suivent le calcul de la profondeur moyenne qui est aux alentours de 34 cm pour les zones de références 1 et 2 alors qu'elles sont aux alentours de 17 cm pour les zones de référence du sud jurassien.

2.4.3.3. Indice synthétique de qualité édaphique des sols.

L'objectif est d'attribuer à chaque UTG, une proportion de sigles (types de sols) décrit sur le terrain.

Les transects n'étant pas de la même longueur, un indice quantitatif relatif a été mis au point pour les comparer entre eux. Cet indice est la « capacité d'échange et réserve utile » (CERU) (Figure 3.13). Il s'agit d'un indice synthétique prenant en compte les paramètres indispensables pour la description de l'environnement des arbres : nutrition (minérale et hydrique) et profondeur du sol (contraintes mécaniques pour les racines, volume de sol prospectable). La nutrition est estimée par le calcul d'une moyenne de texture du profil décrit correspondant au coefficient de réserve utile en eau. Le pourcentage est matière organique est pris en compte dans le calcul de la réserve utile par ajout d'un coefficient (1,25) pour les horizons humifères. Cet indicateur synthétique est adapté à la description de la variabilité des propriétés édaphiques des sols du massif du Jura.

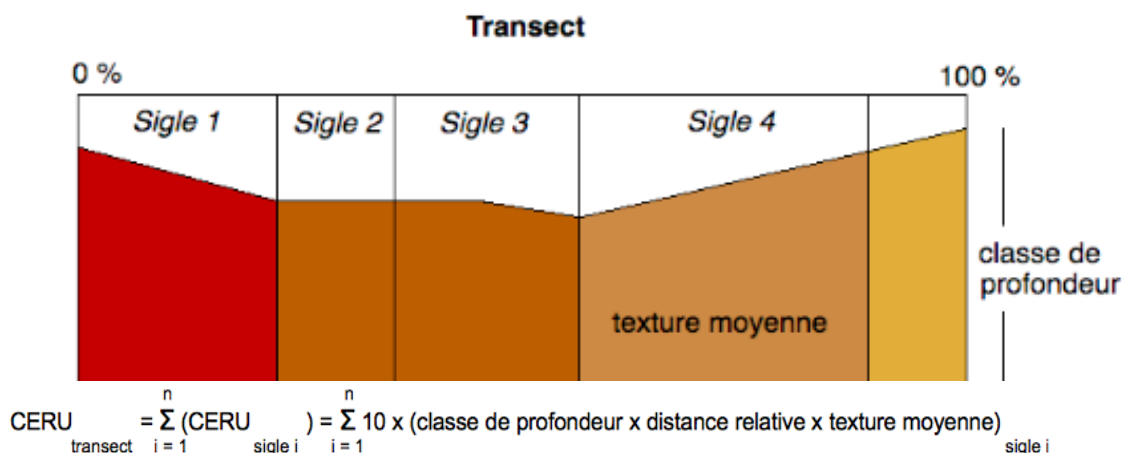


Figure 3.13. Indice CERU (Capacité d'Echange et Réserve Utile) ($CERU_{transect} = CERU$ du transect ; $CERU_{sigle i} = CERU$ du sigle i ; cp = classe de profondeur ; d = distance relative du sigle n sur le transect (en %) ; t = texture moyenne du sigle i).

2.4.3.4. Analyse des données CERU.

Une information renseignant sur le type de faciès géologique, la classe de pente et l'UTG a été ajoutée pour chaque transect.

Il nécessaire de savoir comment se répartissent les valeurs de CERU en fonction de la localisation géographique et de la nature des UTG.

Existe-il une différence de CERU entre les trois zones de référence et entre les UTG ?

Pour chaque UTG, une liste de sigles décrivant les sols a été dressée, une liste des sigles susceptibles d'être rencontrés ainsi que leur proportion. Il s'agit de faire des tris et des regroupements en prenant en compte l'altitude, la position longitudinale et latitudinale, la

proportion de sigle et la CERU. Le premier tri a pris en compte les ZR et l'altitude. Un choix a été nécessaire pour les classes d'altitude à retenir. Trois classes ont été retenues (600-800 m, 800-1100 m, >1100 m) grâce aux régions naturelles et à la localisation géographique des grands massifs forestiers.

En intégrant la capacité hydrique et la nutrition minérale du sol, la CERU est un indicateur synthétique particulièrement adapté. Elle permet de mettre en parallèle les capacités édaphiques du sol avec le type de roche et le faciès qu'il lui est associé.

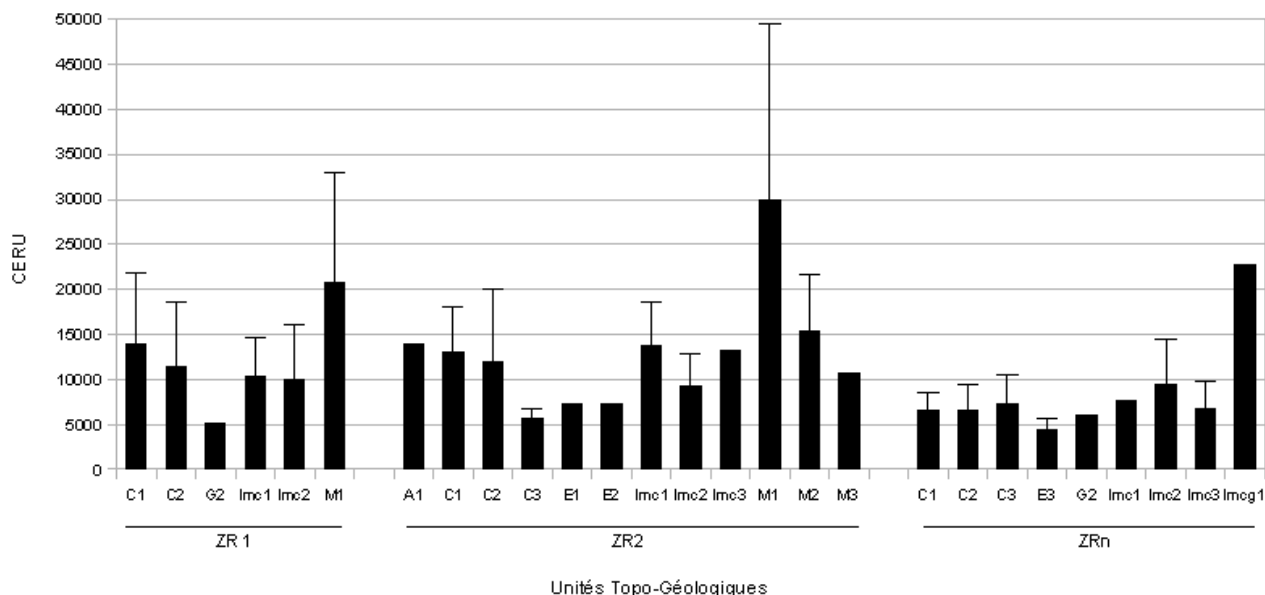


Figure 3.14. Moyenne de CERU par UTG pour chaque ZR (« ZRn » correspond au regroupement des données des transects des zones de référence 3 et 4).

Les données de CERU (Figure 3.14) montrent que les sols sur marnes (M) plus profonds présentent une CERU plus élevée que les autres sols (supérieure à 20000 pour les UTG M1). L'accentuation de la pente montre nettement une chute de la CERU (marnes de la ZR2). Cette remarque est confirmée pour les calcaires des ZR1 et ZR2 (ZR1 : C1 = 14000, C2 = 11000 ; ZR2 : C1 = 13000, C2 = 12000, C3 = 6000). Pour la ZRn, les moyennes de CERU ne montrent pas de différence avec la pente. La ZRn présente les CERU les moins élevées, de part ses pentes marquées qui entraînent la formation de sols plus superficiels (CERU inférieures à 10000). Toutefois, l'UTG sur le complexe marno-calcaire et grès présente une valeur de CERU équivalente (22500) à celle des marnes sur pente faible de la zone de référence 1. Les UTG sur glaciaires ou sur éboulis présentent des CERU plus faibles que celle des sols sur calcaires ou sur complexe marno-calcaire. Il existe une grande diversité de CERU pour les UTG du complexe marno-calcaire. En effet, ces UTG regroupent des sols qui se sont développés sur calcaires, calcaires marneux et marnes.

Les écart-types des CERU, calculées pour chaque UTG, sont importants pour les UTG de marnes sur pentes faibles (12000 à 19000). A l'opposé, les écart types des sols les plus superficiels sont moins élevés voire inexistant (0). L'exception de l'UTG lme3g1 de la zone de référence montre que malgré la forte CERU, l'écart type est nul. Cela est la conséquence du nombre réduit de transect dans cette UTG.

Existe-il une relation entre la CERU et l'altitude de la zone de référence considérée ?

Seules les données CERU et Altitude(ZR1) suivent la loi normale, cela justifie l'utilisation de tests non-paramétriques.

Les tests de corrélation montrent qu'il existe des relations significatives entre l'altitude et la CERU des ZR1 et ZRn ainsi que pour le massif dans son ensemble.

La figure 15 montre que l'amplitude des CERU (sur les trois zones de référence réunies) diminue avec l'augmentation de l'altitude. Cependant, prises séparément, les zones de référence ne suivent pas la même tendance. La ZR2 ne montre pas de relation entre ces deux paramètres. La ZRn montre une relation inverse.

La corrélation a été testée pour plusieurs autres couples de variables : CERU vs Pente, CERU vs Type de contrainte, CERU vs Nombre de sigles (par transect), Pente vs Nombre de sigles (par transect), Nombre de Sigles (par transect) vs Type de Contrainte. Les corrélations sont significatives pour Pente vs Nombre de Sigles (par transect) et Nombre de sigles(par transect) vs Type de Contrainte.

Tests de corrélation de rang de Spearman

	CERU-Altitude	ZR1CERU-ZR1Altitude	ZR2CERU-ZR2Altitude	ZRnCERU-ZRnAltitude
rs	0,343	-0,509	0,131	0,378

Données significatives en gras ($p < 0,05$)

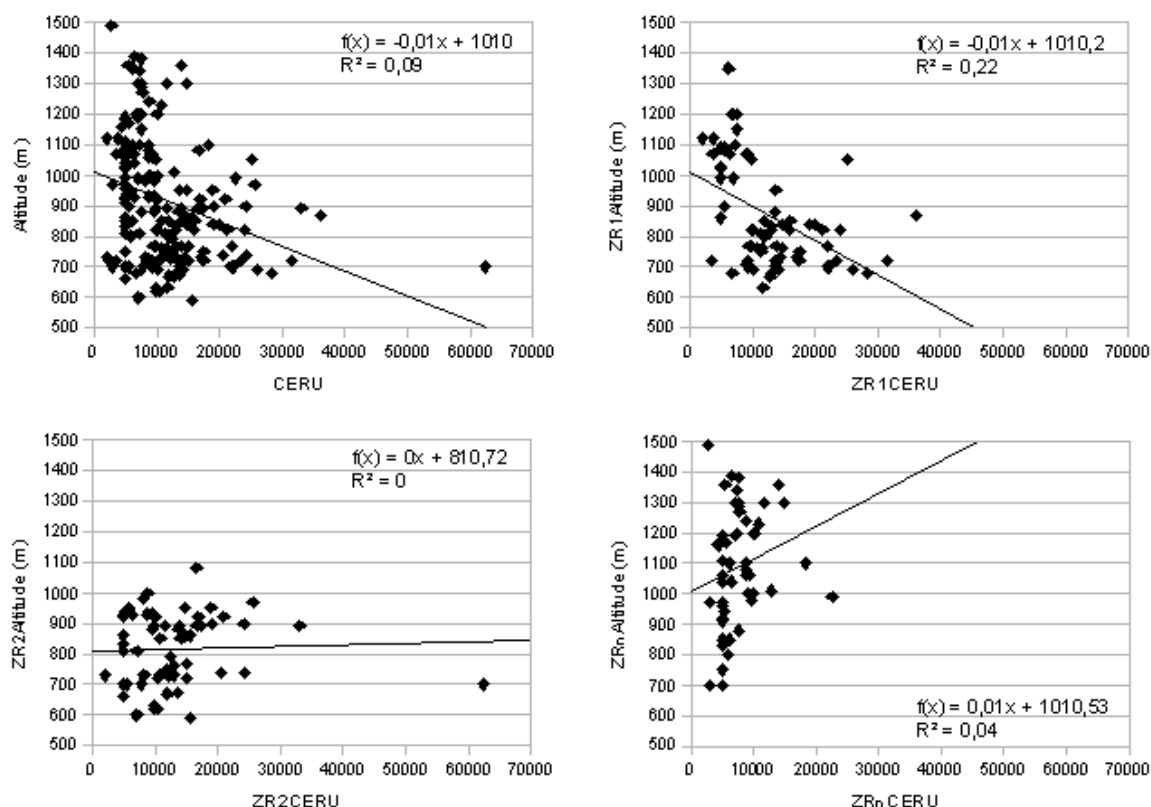


Figure 3.15. Tests de corrélation des CERU et de l'altitude sur les données du massif, puis par zone de référence (ZRnAltitude : altitudes des transects de la zone de référence n, ZRnCERU : valeur de CERU pour les transects de la zone de référence n) (« ZR3 » correspond au regroupement des données des transects des zones de référence 3 et 4. « CERU » correspond au regroupement des 4 ZR).

Existe-il une différence de la CERU au sein des étages sub-divisés sur la carte géologiques ?

Les tests t au sein d'un étage géologique ne montrent pas de différence significative de la valeur de CERU (sauf J1nzt1-J1nzt2, J7nzt1-J7nzt et J7nzt2-J7nzt) (Tableau 3.8).

Test t – intra-géologie

Moy. CERU	t
J1b/J1c	-1,554
J1nzt1/J1nzt2	3,171
J2zt1/J2zt2	-0,708
J2zt1/J2zt3	1,444
J2zt2/J2zt3	2,116
J3/J3a	0,226
J6nzt1/J6nzt2	0,501
J6nzt1/J6nzt3	2,151
J6nzt2/J6nzt3	1,799
J7/J7a	-2,123
J7/J7b	-1,603
J7a/J7b	0,840
J7nzt1/J7nzt2	-1,015
J7nzt1/J7nzt3	2,879
J7nzt2/J7nzt3	3,897
J8/J8a	-0,015
J8/J8b	-0,804
J8a/J8b	-0,799
J8nzt1/J8nzt2	0,633
J8nzt1/J8nzt3	1,613
J8nzt2/J8nzt3	1,351
J9zt1/J9zt3	0,991
Données significatives en gras ($p < 0,05$)	

Tableau 3.8. Comparaison à l'intérieur des étages géologiques de la CERU (« ZRn » correspond au regroupement des données des transects des zones de référence 3 et 4). Il s'agit des comparaisons des différents sous-étages géologiques entre eux (ex : J1b et J1c). Des comparaisons sont également effectuées entre les étages des différentes zones de référence en regroupant les variantes de chaque étages (J7/J7a/J7b devient J7n).

Existe-il un effet de l'altitude sur la CERU au sein et entre les zones de référence.

Les tests t sur l'altitude montrent des différences significatives entre les altitudes basses et moyennes de ZRn avec celles des ZR1 et 2. Il existe aussi une différence significative entre les altitudes élevées de la ZR1 et les altitudes basses et moyennes de la même ZR. Il en est de même pour entre les altitudes basses et élevées de la ZRn (Tableau 3.10).

Tableau 3.9. Comparaison entre étages géologiques de la CERU (« ZRn » correspond au regroupement des données des transects des zones de référence 3 et 4).

Moy. CERU	J1zt1	J1zt2	J2	J3	J4	J5	J6	J7zt12	J7zt	J8	J9	n2	n3	eep
J1zt1														
J1zt2	3,171													
J2	3,734	-0,337												
J3	4,055	-0,315	0,078											
J4	-0,754	-1,792	-1,739	-1,759										
J5	1,438	-2,270	-2,840	-3,283	1,163									
J6	2,916	-0,771	-0,656	-0,795	1,590	1,855								
J7zt12	3,237	-0,992	-1,085	-1,461	1,576	2,174	-0,156							
J7zt	5,463	1,321	2,600	3,013	2,194	5,075	2,806	3,979						
J8	3,954	0,019	0,518	0,529	1,832	3,123	1,057	1,549	-1,884					
J9	5,045	0,821	1,894	2,228	2,055	4,563	2,218	3,307	-0,854	1,191				
n2	6,752	2,347	4,538	5,606	2,457	6,877	4,322	6,479	1,613	3,544	2,703			
n3	4,820	0,674	1,393	1,701	1,955	4,316	1,814	2,953	-1,633	0,664	-0,749	-3,883		
eep	5,107	1,259	2,274	2,508	2,189	4,553	2,551	3,363	0,030	1,686	0,759	-1,320	1,386	

Données significatives en gras ($p < 0,05$)

Test t – Altitude

Moy. CERU

azr1	azr2
azr1	azm
azr2	azm
bzr1	bzr2
bzr1	bzrn
bzr2	bzrn
czt1	czt2
czt1	czt2
czt2	czm
azr1	bzr1
azr1	czt1
bzr1	czt1
azr2	bzr2
azr2	czt2
bzr2	czt2
azm	bzrn
azm	czm
bzrn	czm

Tableau 3.10. Comparaison des CERU par classe d'altitude
(« ZRn » correspond au regroupement des données des transects des zones de référence 3 et 4). L'information sur l'altitude est ajoutée devant le nom de la zone de référence (ex : aZR2 : altitude basse pour la zone de référence 2).

Données significatives en gras
($p < 0,05$)

Classes d'altitude (m)

a	600-800
b	800-1000
c	1000-1500

Existe-il une différence de la valeur de CERU entre les étages géologiques ?

Le tableau 3.9 (moyenne CERU par géol) montre que l'étage J1zr1 est différent significativement des autres étages géologiques. Il en est de même pour J6 et J7zr1-2. Ces comparaisons basées sur le faciès de la roche ne permettent pas de différencier les étages les uns par rapport aux autres. Ce paramètre, considéré seul, ne permet pas prédire les propriétés du sol ou la variabilité de CERU.

Sauf exception (étages J1 et J7), il n'y a pas de différence significative en fonction de la ZR pour les différents étages géologiques. Le J1 s'individualise entre ZR1 et ZR2 malgré la présence de calcaires et de marno-calcaires dans les deux ZR. Le J7 de la ZRn s'individualise par rapport aux ZR1 et ZR2 malgré un faciès proche (tableau de faciès géologique, en annexes). Cette différence est relevée de nouveau entre altitudes basses et moyennes de la ZRn par rapport au ZR1 et ZR2. Cela montre qu'il existe un effet marqué pour le sud du massif.

Classification hiérarchisée des étages géologiques.

Afin de compléter l'analyse par les tests statistiques, une représentation issue d'une classification hiérarchisée ascendante permet une lecture facilitée des liens entre les différents étages géologiques. Elle permet de mettre en évidence les groupes mettant en lien CERU et type de faciès de la roche.

Lorsque l'on compare les deux classifications (Figure 3.16), les groupes sont quasiment

identiques pour les deux sources de données. Les dendrogrammes prennent en compte les différences significatives notées précédemment pour J1 et J7. L'étage J4 se différencie car il s'agit de marnes. La partie inférieure du dendrogramme regroupe les étages qui présentent un faciès calcaire : J9, n2, J1ZR1, J5. En remontant, les étages complexes, marno-calcaires, apparaissent. Ce mode de représentation montre que les étages géologiques peuvent être ordonnés selon leurs propriétés (CERU). Ce mode de traitement permet d'effectuer des regroupements afin de définir des stations à étudier à une échelle locale.

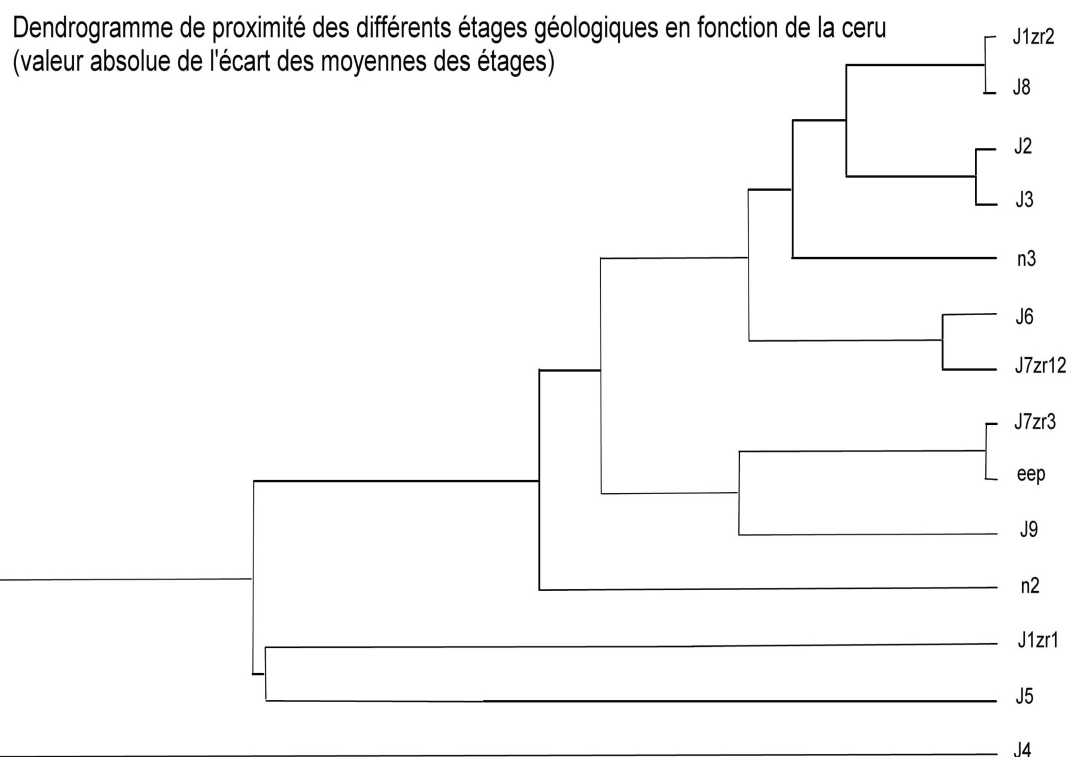
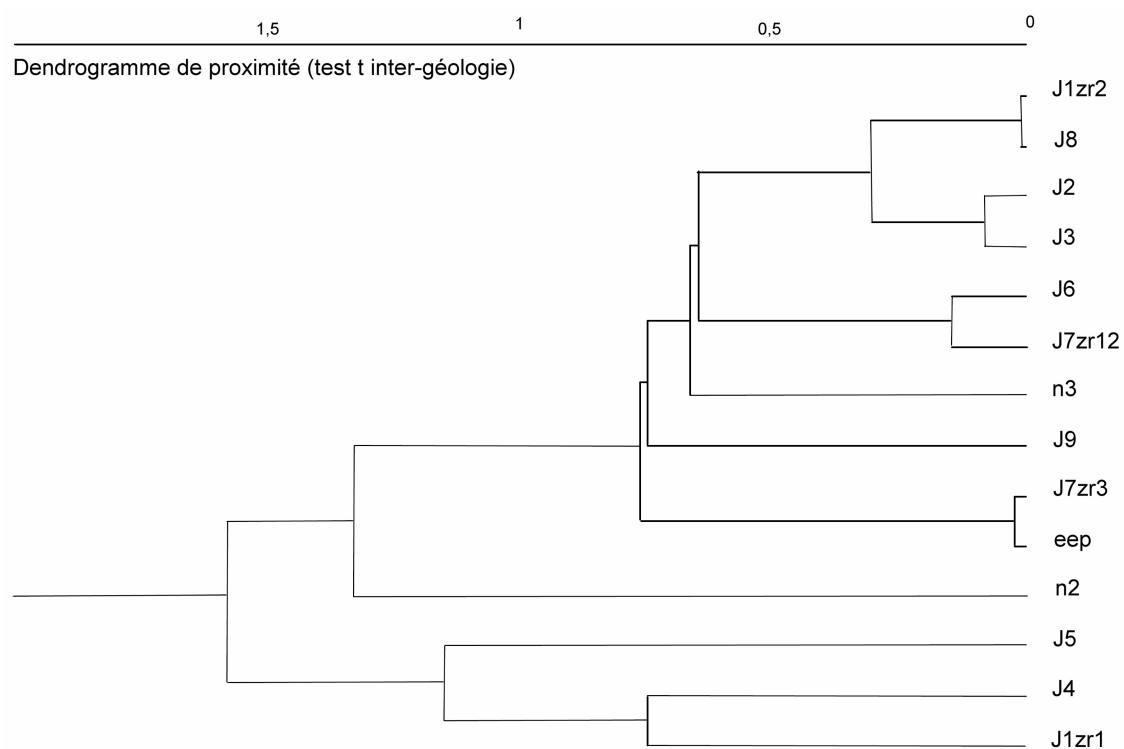


Figure 3.16 . Classification ascendante, en lien simple, des étages géologiques en fonction de leur CERU et de leur proximité (test t).

2.4.4. Typologie du contenu des unités pédologiques (UCS).

Si les unités cartographiques des points précédents (UG, UT et UTG) ont été numérisées indépendamment des zones de référence (changement d'échelle), les unités de complexes de sols (UCS) sont le résultat de l'analyse des transects, échantillonnés dans les zones de référence. Chaque UTG doit être associée à un ensemble de probabilités de présence d'un sigle morpho-édaphique donné.

L'analyse de la CERU des étages géologiques a montré (*cf.* 1.4.3.3.) qu'il n'y avait pas de différence significative entre les zones de référence, sauf pour J1 (ZR1/ZR2) et J7 (ZR1/ZR3-4 et ZR2/ZR3-4). Cependant ces étages ont une variabilité importante et appartiennent à une même unité complexe. Les sigles morpho-édaphiques tiennent compte de la variabilité au sein des zones de référence. L'information recueillie dans une zone de référence peut être employée pour les autres zones de références.

Les sigles morpho-édaphiques sont regroupés par UTG sans tenir compte de l'appartenance à une ZR. Les pourcentages de présence de chaque sigle sont additionnés.

Le traitement des données permettant la définition des UCS est issu de la démarche employée pour le tris des sigles des UTG (*cf.* 1.4.3.2.). Plusieurs UTG ont été regroupées (A, G, Imcg, E) car leur surface est réduite et leur diversité en terme de sigles est réduite (*Tableau 3.11*). La différenciation par les UG a été conservée mais les UT ont été regroupées puisqu'elles ne présente pas une variabilité importante ou une surface faible. La spatialisation des complexes de sols passe de 21 UTG à 13 UCS (Unités Complexes de Sols) (*Tableau 3.12*). Les sigles illustrant les UCS sont issus de l'addition des sigles décrivant les UTG correspondantes. Les redondances sont ensuite supprimées.

Tableau 3.11. Pourcentage de présence des sigles morpho-édaphiques par UTG.

UTG	Sigles morpho-édaphiques	% sigle / UTG	UTG	Sigles morpho-édaphiques	% sigle / UTG
A1	T*/très profond	100	lmc1	*/K/superficiel	2
C1	*/K/superficiel	1	lmc1	A*/profond/humifère	0
C1	A*/superficiel(1)-moyen(2)	2	lmc1	A/K/superficiel	3
C1	A/K/superficiel(19)-moyen(1)/humifère	15	lmc1	A/K/superficiel(91)-moyen(9)/humifère	5
C1	A/K/superficiel/humifère	8	lmc1	A/K/superficiel/humifère	14
C1	A/O/superficiel	0	lmc1	A/M/superficiel	0
C1	AL/K/superficiel	1	lmc1	AL*/	0
C1	AL/K/superficiel(29)-moyen(1)-profond(1)	24	lmc1	AL*/moyen	1
C1	AL/K/superficiel(31)-moyen(4)	5	lmc1	AL/K/superficiel	2
C1	AL/O/superficiel	1	lmc1	AL/K/superficiel(45)-moyen(3)	32
C1	L*/moyen(10)-prof(2)-très profond(2)	2	lmc1	AL/O/moyen	1
C1	L*/moyen(10)-prof(4)-très profond(3)	13	lmc1	AL/S/superficiel	1
C1	L/E/superficiel	2	lmc1	L*/moyen(7)-profond(10)	4
C1	L/K/superficiel(10)-moyen(11)	3	lmc1	L*/profond	0
C1	L/K/superficiel(13)-moyen(6)-profond(<1)/humifère(4)	15	lmc1	L/E/superficiel	1
C1	L/K/superficiel(37)-moyen(2)/humifère(31)	1	lmc1	L/J/moyen	1
C1	L/O/superficiel(3)-moyen(3)	4	lmc1	L/K/superficiel(20)-moyen(6)-profond(1)	19
C1	L/S/moyen	0	lmc1	L/K/superficiel(32)-moyen(14)	11
C1	L/S/superficiel(<1)-moyen(<1)	1	lmc1	L/O/superficiel(1)-moyen(1)	2
C2	A*/superficiel/humifère	1	lmc2	*/K/superficiel	4
C2	A/K/superficiel/humifère	39	lmc2	A*/très profond/humifère	1
C2	AL*/profond	2	lmc2	A/K/superficiel	4
C2	AL/K/superficiel	2	lmc2	A/K/superficiel/humifère	34
C2	AL/K/superficiel(13)-moyen(12)	6	lmc2	A/O/superficiel(12)-moyen(20)	4
C2	AL/K/superficiel(7)-moyen(4)	3	lmc2	AL/K/superficiel	6
C2	L*/profond	5	lmc2	AL/K/superficiel(38)-moyen(2)	14
C2	L*/profond/humifère	5	lmc2	AL/K/superficiel(55)-moyen(7)	22
C2	L/K/superficiel	13	lmc2	L*/profond	6
C2	L/K/superficiel(15)-moyen(8)-profond(33)/humifère(28)	22	lmc2	L*/superficiel	1
C2	L/K/superficiel(21)-moyen(9)/humifère	3	lmc2	L/K/moyen	1
C3	A/K/superficiel/humifère	83	lmc2	L/K/superficiel	1
C3	AL/K/superficiel	16	lmc2	L/K/superficiel(4)-moyen(8)/humifère(3)	1
E1	A/K/superficiel/humifère	56	lmc3	A/K/superficiel(69)-moyen(31)/humifère	26
E1	AL/K/superficiel	44	lmc3	A/K/superficiel/humifère	74
E2	A/K/superficiel/humifère	100	M1	A*/moyen	42
E3	A/K/superficiel	29	M1	A*/profond(17)-très profond(8)/humifère	12
E3	A/K/superficiel/humifère	19	M1	A/K/superficiel/humifère	2
E3	L/K/superficiel	52	M1	AL/K/superficiel	6
G2	A/K/superficiel	69	M1	AL/S/profond	7
G2	A/K/superficiel/humifère	1	M1	L*/moyen(21)-très profond(6)	12
G2	AL/K/superficiel	30	M1	L/K/superficiel	2
lmcg1	A/W/moyen	100	M1	L/K/superficiel(10)-moyen(10)	9
			M1	L/O/superficiel(4)-profond(8)	6
			M1	L/S/profond	2
			M2	A/K/superficiel(10)-moyen(5)/humifère	16
			M2	AL/K/superficiel(15)-moyen(11)	25
			M2	AL/O/superficiel	10
			M2	L*/superficiel(3)-profond(7)	9
			M2	L/K/moyen	14
			M2	Th*/très profond	26
			M3	AL/K/superficiel/humifère	100

la différence à 100% est la conséquence des transects coupant 2 UTG différentes ainsi que les arrondis.

En grande majorité, il s'agit de sols qui se développent sur un substrat calcaire (banc ou cailloutis calcaire) (Figure 3.17). A l'échelle d'étude, la grande diversité des sols du massif jurassien est représentée par l'ensemble des UCS qui expriment les sols les plus fréquemment rencontrés.

Tableau 3.12. Correspondances entre les UTG et les UCS.

UTG	UCS
A1/A2/A3	1
Imcg1/Imcg2/Imcg3	2
M1	3
M2	4
M3	5
G1/G2/G3	6
E1/E2/E3	7
C1	8
C2	9
C3	10
Imc1	11
Imc2	12
Imc3	13

Unités Complexes de Sols (UCS)

	1 - Sols profonds argileux / Tourbe.
	2 - Sols de profondeur moyenne argileux.
	3 - Sols profonds argileux / Sols superficiels argileux à limoneux.
	4 - Sols superficiels argileux / Sols de profondeur moyenne limoneux.
	5 - Sols superficiels humifères à texture équilibrée.
	6 - Sols superficiels argileux à équilibrés.
	7 - Sols superficiels argileux ou équilibrés sur pente forte.
	8 - Sols superficiels humifères argileux / Sols superficiels à texture équilibrée ou limoneuse.
	9 - Sols superficiels humifères argileux / Sols superficiels ou de profondeur moyenne à texture équilibrée.
	10 - Sols superficiels humifères argileux ou à texture équilibrée.
	11 - Sols superficiels humifères argileux / Sols superficiels à texture équilibrée / Sols profonds limoneux.
	12 - Sols superficiels humifères argileux ou équilibrés / Sols de profondeur moyenne argileux.
	13 - Sols superficiels à moyennement profonds humifères argileux.

Figure 3.17 . Contenu des unités de complexes (ou cartographiques) de sol (UCS).

UCS 1

Les sols sont majoritairement profonds et argileux. La présence de tourbe est possible. Il s'agit de sols dont la profondeur peut dépasser 1 mètre de profondeur, se caractérisant par l'absence d'obstacle. Ils sont présents sur des pentes nulles à faibles (0 – 5°). Après le traitement de données, un sigle a été retenu. La CERU moyenne est de 14000±0.

UCS 2

Les sols sont essentiellement de profondeur moyenne (environ 50 cm) et de texture argileuse. L'obstacle le plus courant est morainique. Ces sols se développent sur des pentes nulles ou faibles (0 – 5°). Après le traitement des données brutes, 2 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 23000±0.

UCS 3

Les sols moyens à profonds et argileux sont représentés à la hauteur de 60% de probabilité. A ces sols, sont associés des sols superficiels (17%) argileux (8%) ou limoneux (17%). L'amplitude de profondeur de cette UCS est importante (0 – 70 cm). Les obstacles se diversifient (Absence d'obstacle, cailloutis graveleux, argiles, cailloux et banc calcaires). Les pentes concernées sont nulles ou faibles (0 – 5°). Après le traitement des données brutes, 10 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 25000±16000.

UCS 4

Pour 50%, les sols sont superficiels et argileux. Ils est probable de rencontrer des sols de profondeur moyenne (14%) à texture limoneuse (23%). Les profondeurs relevées vont de 20 centimètres à plus d'un mètre. La présence de tourbe est également probable (25%). Diversité des obstacles est importante (absence, argiles, cailloux et banc calcaires). Cette unité se caractérise par des pentes moyennes (5 – 15°). Après le traitement des données brutes, 6 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 15000±6000.

UCS 5

Les sols sont majoritairement superficiels, humifère à texture équilibrée. La profondeur moyenne est de 20 à 30 centimètres. L'obstacle le plus courant est formé d'un banc calcaire. Les pentes fortes (>15°) caractérisent cette unité. Après le traitement des données brutes, 1 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 11000±0.

UCS 6

Les sols sont majoritairement superficiels (0 – 20 cm) à texture argileuse (70%) à équilibrée (30%). Les obstacles rencontrés dans ces sols sont sous forme de cailloux calcaires. Cette unité se caractérise par des pentes nulles à moyennes. Après le traitement des données brutes, 3 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 5000±0.

UCS 7

Les sols sont majoritairement superficiels (0 – 30 cm) avec une proportion importante de sols au caractère humifère (60%) et à texture argileuse (70%). Les obstacles les plus fréquents sont des cailloux calcaires. Les sols de cette unité peuvent se rencontrer sur tout type de pente. Après le traitement des données brutes, 6 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 6000±2000.

UCS 8

Trois grands types de sols sont représentés en proportion similaire : les sols de profondeur moyenne ou profonds à texture limoneuse (35%), les sols superficiels à texture équilibrée (30%) et les sols superficiels humifères à texture argileuse (25%). L'amplitude de profondeur est importante (0 – >100 cm). La diversité des obstacles est également importante (absence d'obstacle, banc et cailloux calcaires, cailloutis graveleux, argiles, limons siliceux). Les pentes sont nulles ou faibles (0 – 5°). Après le traitement des données brutes, 18 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 11000±7000.

UCS 9

Deux grands types de sols sont représentés dans cette unité : les sols superficiels à profondeur moyenne à texture équilibrée (60%) et les sols superficiels humifères argileux (40%). L'amplitude de profondeur de cette unité est importante (0 – 80 cm). Les types d'obstacle sont de deux types : bancs et cailloux calcaires. Cette unité se caractérise par des pentes moyennes (5 – 15°). Après le traitement des données brutes, 11 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 10000±6000.

UCS 10

Les sols sont majoritairement superficiels (0 – 40 cm) et humifères (85%). Leur texture est soit argileuse (83%) soit équilibrée (17%). Les sols sont contraints par des obstacles de types bancs ou cailloux calcaires. Les pentes de cette unité sont fortes ($>15^\circ$). Après le traitement des données brutes, 2 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 6000 ± 3000 .

UCS 11

Trois types de sols sont représentés dans cette UCS : les sols superficiels à texture équilibrée (35%), les sols superficiels humifères argileux (20%) et les sols profonds à texture limoneuse (10%). L'amplitude de profondeur est importante (0 – 90 cm). Un grand nombre de types d'obstacles, aux caractéristiques très différentes, caractérise cette unité (absence, bancs et cailloux calcaires, argiles, cailloutis graveleux, limons siliceux, calcaires marneux, calcaire poudreux. Les pentes sont faibles (0 – 5°). Après le traitement des données brutes, 19 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 11000 ± 4000 .

UCS 12

Deux grands ensembles de sols se détachent : les sols superficiels (80%) humifères (35%) à texture argileuse (40%) ou équilibrée (40%) et les sols de profondeur moyenne (10%) à texture argileuse. L'amplitude de profondeur des sols est maximale dans cette unité (0 – >100 cm). Le type d'obstacle est également hétérogène, de l'absence de contrainte sur la profondeur à la présence d'un banc ou de cailloux calcaires, voire d'argiles. Les pentes présentes sont moyennes (5 – 15°). Après le traitement des données brutes, 13 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 10000 ± 5000 .

UCS 13

Les sols sont majoritairement argileux et humifères. Leur profondeur est soit superficielle (90%) ou moyenne (10%) (0 – 40 cm). Les obstacles relevés sont de type « banc ou cailloux calcaires ». Cette unité se caractérise par des pentes fortes ($>15^\circ$). Après le traitement des données brutes, 2 sigles morpho-édaphiques ont été conservés. La CERU moyenne est de 10000 ± 4000 .

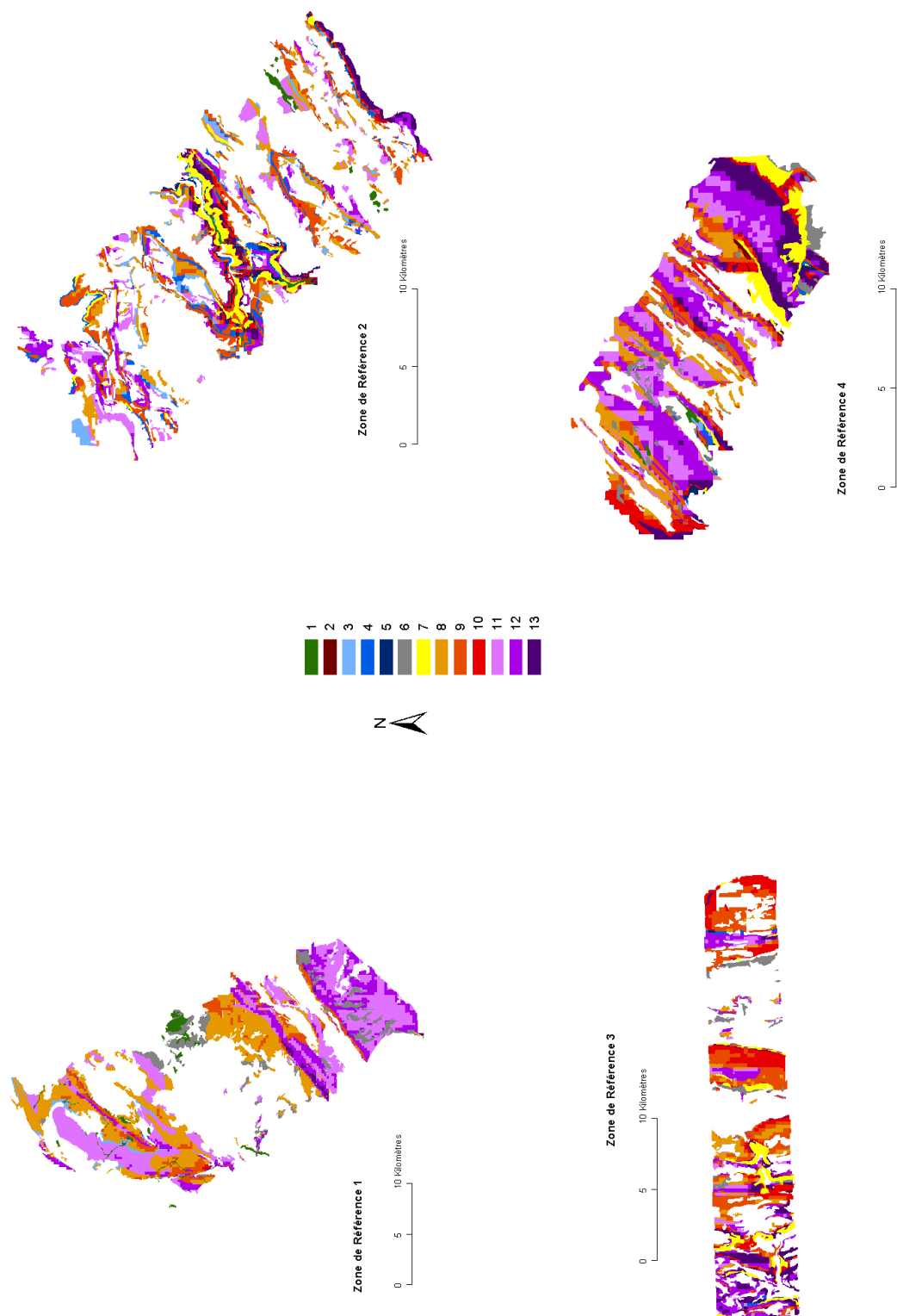


Figure 3.18. Cartes des unités complexes de sols (UCS) pour les zones de référence (ZR).

3. La cartographie des propriétés des sols du massif du Jura.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une cartographie des propriétés des sols du massif, paramètre déterminant de la définition d'un terroir, les informations apportées par les zones de références sont extrapolées à l'échelle du massif.

L'échelle d'étude n'est pas la même que celle des zones de référence. En effet, l'échelle est le 1/100 000 pour l'ensemble du massif (minimum cartographique = 500 m).

3.1. Unités géologiques (UG).

Comme pour les zones de référence, les faciès des étages géologiques sont dominés par les complexes marno-calcaires (*Figure 3.19*). L'unité calcaire est majoritairement présente dans la partie centrale du massif, pour les altitudes les plus basses, mais également dans le sud du massif, pour les altitudes les plus hautes.

Les autres classes sont beaucoup moins représentées. Cependant, l'unité des éboulis n'est pas anecdotique. Ils se trouvent principalement sur les pentes intermédiaires dans le nord, sur la partie très plissée du sud.

3.2. Unités topographiques (UT).

Les pentes du massif jurassien sont relativement faibles (classe 0-5) pour les altitudes les plus basses (*Figure 3.20*). Cette partie est dominée par une structure morphologique tabulaire. Le sud du massif présente des pentes plus importantes (Classe 5-15) avec des pentes importantes sur la Haute-Chaîne (classe 15-90).

3.3. Unités Topo-Géologiques (UTG).

La synthèse des deux couches d'informations précédentes représente la base de la carte des sols du massif du Jura (*Figure 3.21*). Les systèmes de pentes très hétérogènes sur le sud du massif entraînent une fragmentation des UTG important. Cette fragmentation des unités cartographiques sur le nord du massif, est la conséquence du recouvrement forestier dans cette partie du Doubs. Dans sa partie centrale, les UTG se découpent en grandes unités (C1 et Imc1, principalement).

3.4. Carte des complexes de sols (UCS).

Le protocole d'étude mis en place dans les zones de référence et les résultats qui ont été analysés à cette échelle sont appliqués lors du changement d'échelle au sein du massif Jurassien. Les 13 UCS ont été spatialisées suivant l'application du modèle d'organisation des sols d'après les critères de compartiment géologique et des pentes.

Unités géologiques

- Alluvions - Tourbes
- Calcaires durs
- Eboulis
- Glaciaire
- Indifférencié marno-calcaire
- Indifférencié marno-calcaire-grès
- Marnes

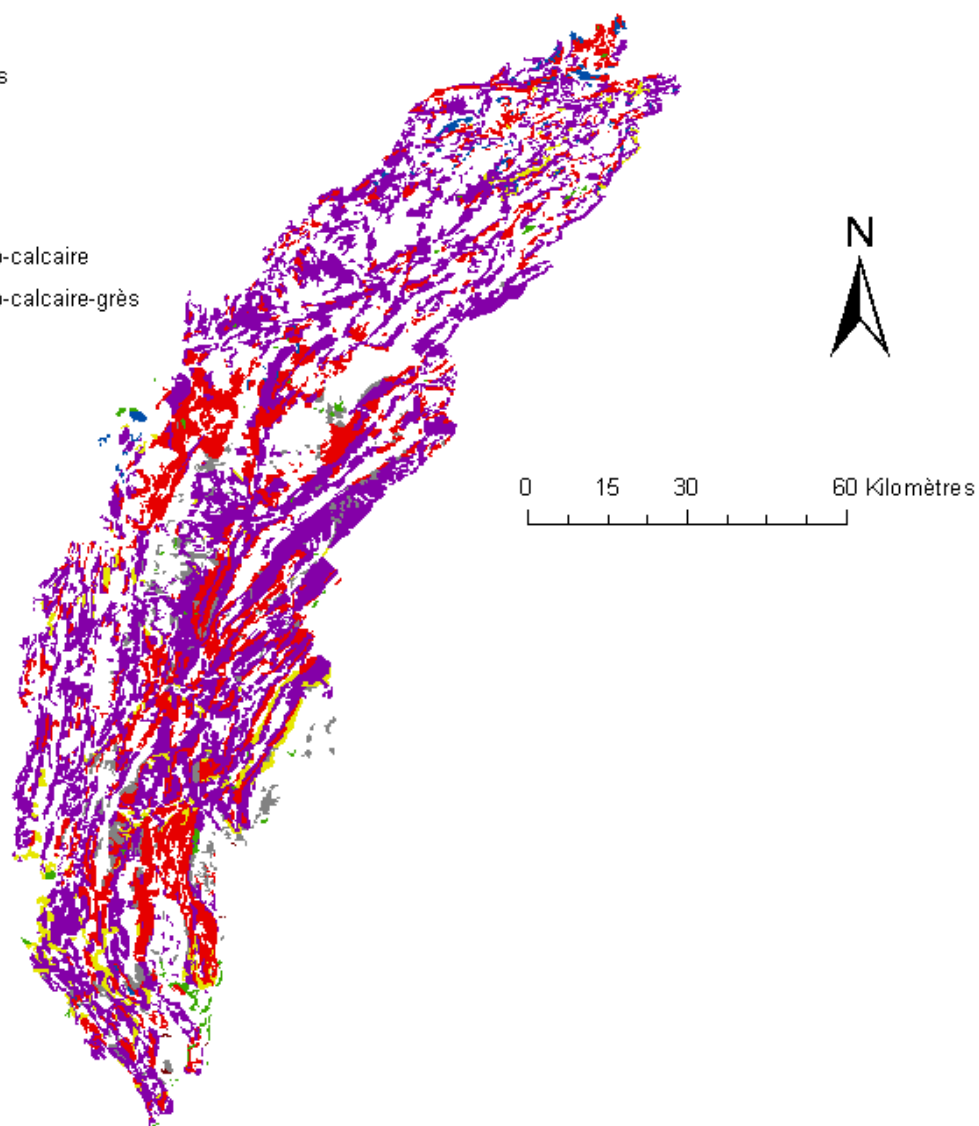


Figure 3.19. Carte des unités géologiques à l'échelle du massif jurassien, numérisées à partir des cartes du BRGM.

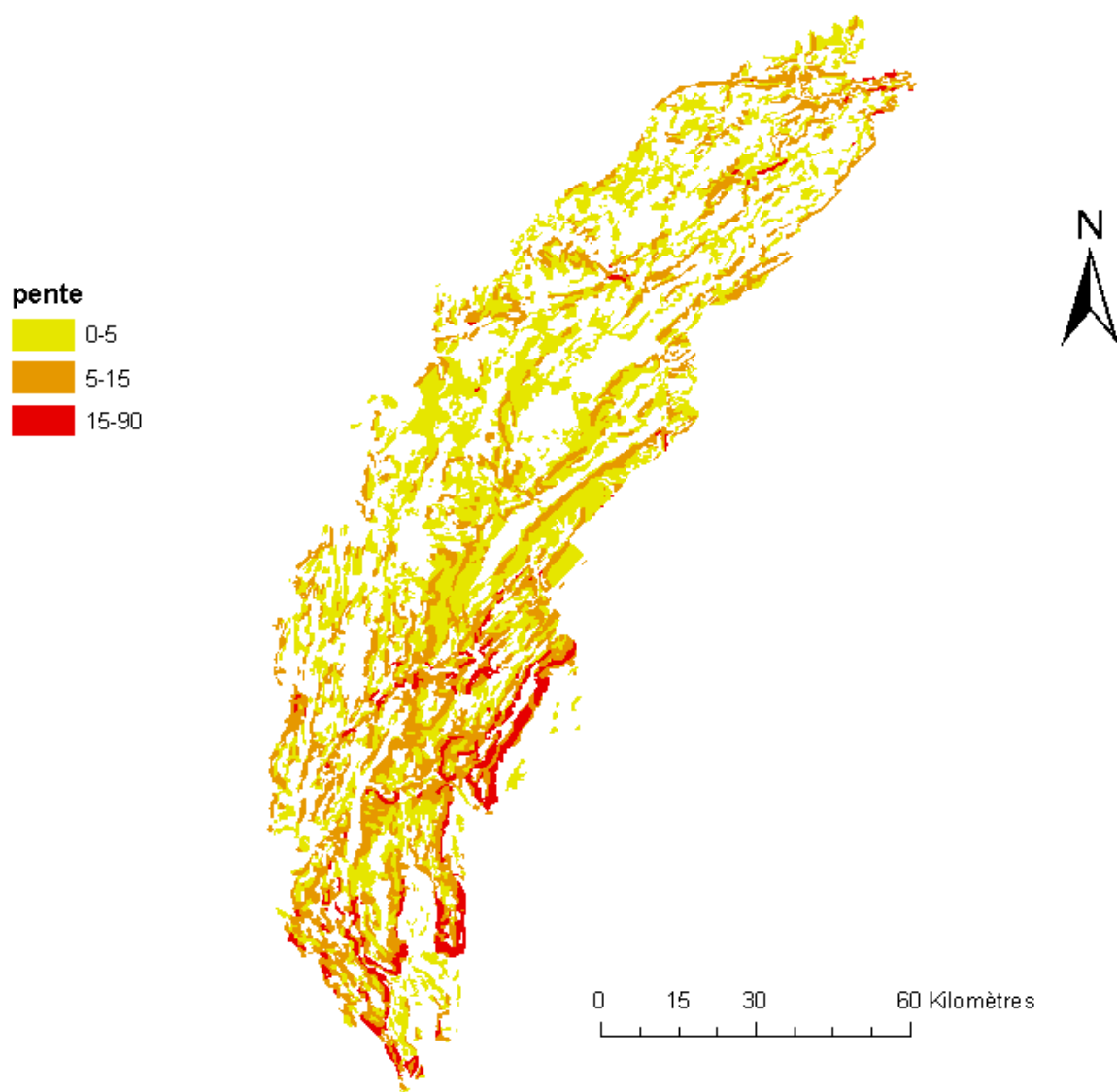


Figure 3.20. Carte des unités de pente (en degrés) à l'échelle du massif jurassien, numérisées à partir du MNT.

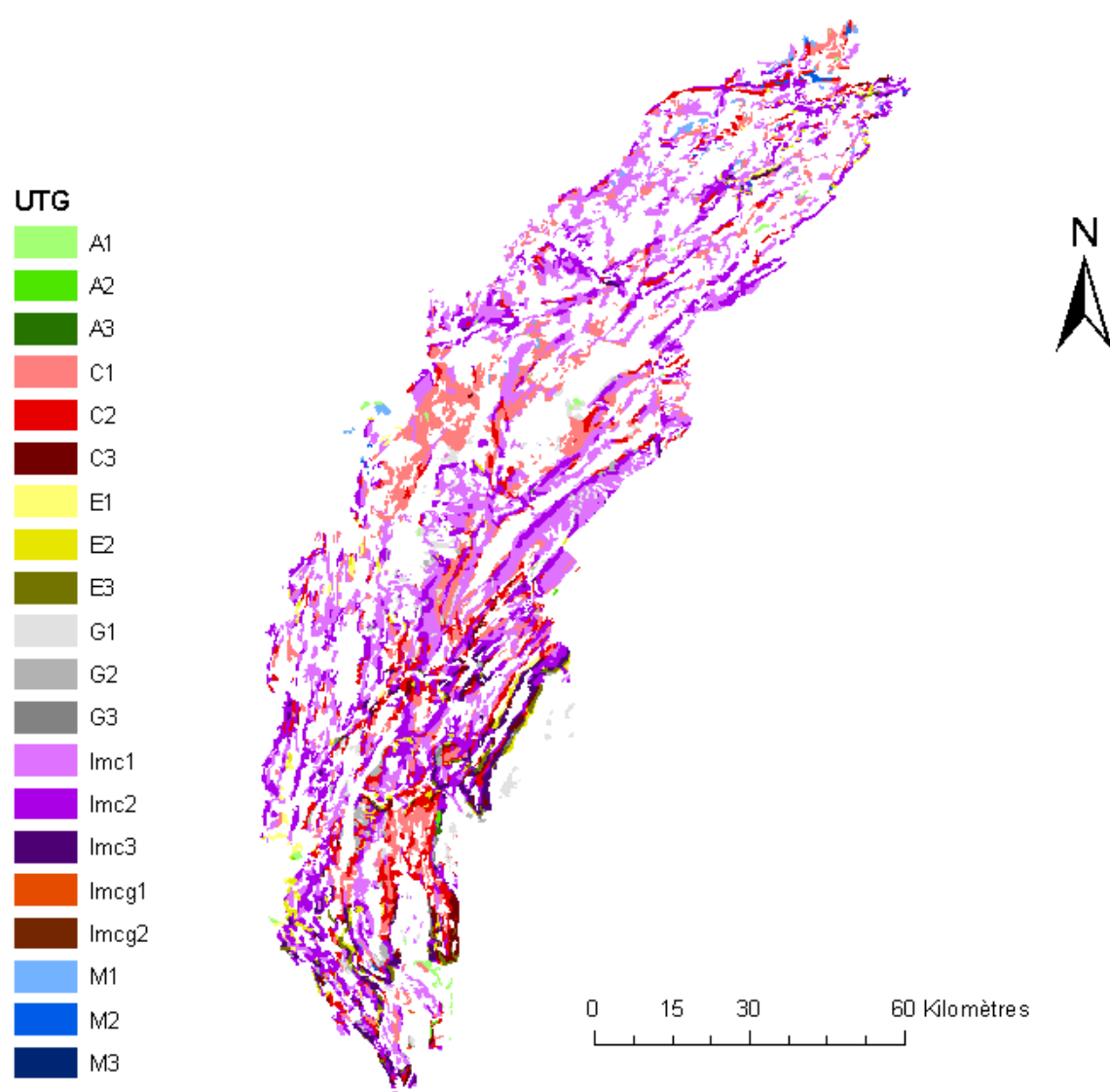


Figure 3.21. Carte des unités topo-géologiques à l'échelle du massif jurassien, issues de la combinaison des UG et des UT.

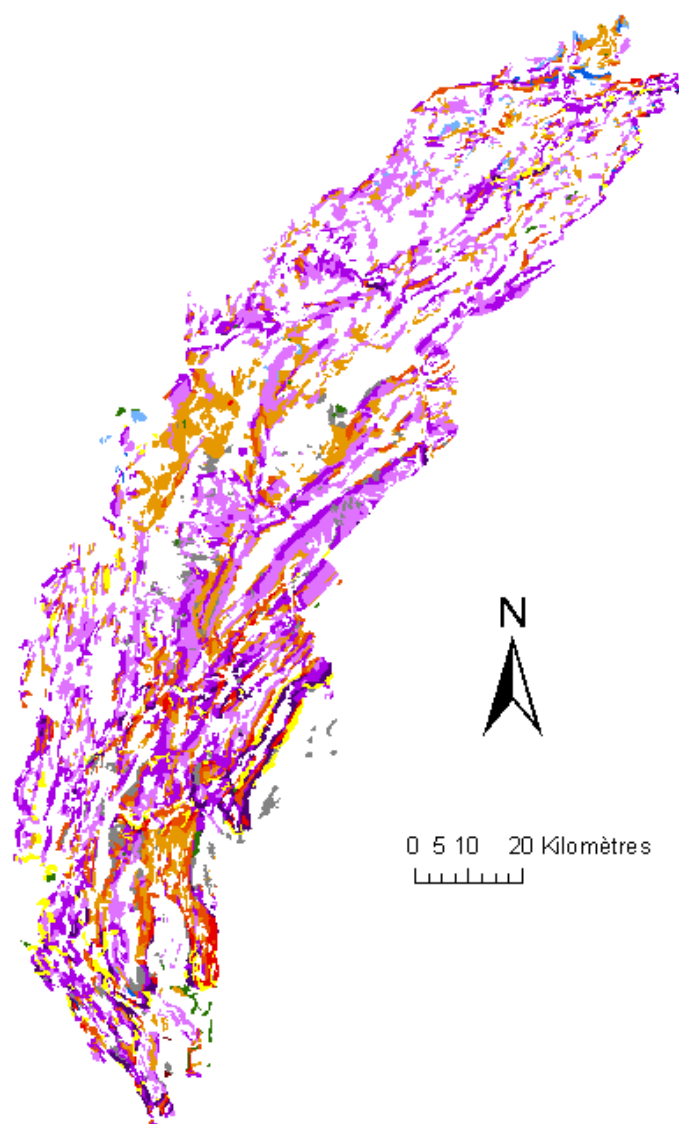
Tableau 3.13. Contribution de chaque unité complexe de sols (UCS) au sein du massif jurassien.

Surface (km ²)													Total
UCS1	UCS2	UCS3	UCS4	UCS5	UCS6	UCS7	UCS8	UCS9	UCS10	UCS11	UCS12	UCS13	
35	2	37	17	1	192	191	763	462	87	1486	1094	156	4523

Le tableau 3.13 montre que la surface du massif jurassien, représentée par les forêts résineuses, est de 4500 km². Les UCS 11 et 12 présentent la plus grande contribution avec des surfaces supérieures à 1000 km². Les UCS 7 et 8 présentent des surfaces comprises entre 500 et 750 km² environ. Quatre unités contribuent pour 100 à 200 km² environ (UCS 10, 13, 6 et 7). Les UCS 1, 2, 3, 4, 5 représentent des surfaces faibles, inférieures à 50 km².

L'UCS 7 (sur éboulis) est principalement rencontré sur les pentes intermédiaires et dans le Sud du massif, pour les pentes les plus abruptes. Les six UCS sur les calcaires durs et le complexe marno-calcaire représentent la majorité de la surface totale de la carte. La partie sud du massif, la plus plissée, est représentée par les unités sur les pentes marquées telles que UCS 9/10/12/13. Le sud du massif présentent une proportion plus importante de sols très superficiels. Les unités hétérogènes (superficielles à profondes) se retrouvent fréquemment dans la partie centrale du massif, pour toutes les classes d'altitude. Comme pour la profondeur du sol, le sud du massif s'individualise par sa texture en proportion plus argileuse (texture argileuse à équilibrée). La proportion de limons augmente dans les unités du centre et du nord du massif. Les grands massifs de la partie centrale se développent sur le complexe marno-calcaire présentant une grande diversité de texture.

Pour résumer, la spatialisation des unités complexes de sols et le détail du contenu montrent que les sols sont majoritairement superficiels à texture argileuse (cf. 1.4.4.) (Figure 3.22).



Unités Complexes de Sols (UCS)

- 1 - Sols profonds argileux / Tourbe.
- 2 - Sols de profondeur moyenne argileux.
- 3 - Sols profonds argileux / Sols superficiels argileux à limoneux.
- 4 - Sols superficiels argileux / Sols de profondeur moyenne limoneux.
- 5 - Sols superficiels humifères à texture équilibrée.
- 6 - Sols superficiels argileux à équilibrés.
- 7 - Sols superficiels argileux ou équilibrés sur pente forte.
- 8 - Sols superficiels humifères argileux / Sols superficiels à texture équilibrée ou limoneuse.
- 9 - Sols superficiels humifères argileux / Sols superficiels ou de profondeur moyenne à texture équilibrée.
- 10 - Sols superficiels humifères argileux ou à texture équilibrée.
- 11 - Sols superficiels humifères argileux / Sols superficiels à texture équilibrée / Sols profonds limoneux.
- 12 - Sols superficiels humifères argileux ou équilibrés / Sols de profondeur moyenne argileux.
- 13 - Sols superficiels à moyennement profonds humifères argileux.

Figure 3.22. Carte des unités de complexes de sol à l'échelle du massif.

4. Discussion.

Spatialisation de la géologie et de la pente - Prézoning

L'utilisation de la géologie et de la topographie afin de prédire la typologie des sols a été employée (*Thomas et al., 1999 ; Laurent et Rossignol, 2003*). *Thomas et al.* (1999) l'ont employé en travaillant sur zone de référence représentative.

Dans le présent travail, une variation du faciès de la géologie a été montrée au sein des unités. Les notices n'ont pas toujours une précision suffisante dans la description de cette variabilité. Leur publication diffère au niveau de la date et les expérimentateurs n'ont pas décrit les propriétés de la roche selon la même efficacité. Le BRGM a publié des cartes numérisées, en mode « vecteur » et homogénéisées qui prennent en compte les limites des cartes voisines.

Le travail initial s'est donc inspiré des notices et les cartes homogénéisées ont permis de faire le lien entre les cartes voisines puisque la géologie a été un paramètre important dans le plan d'échantillonnage (*Pomerol et Renard, 1997*), et renseigne sur les relations entre le sol et la roche sur lequel il s'est développé. Le travail de numérisation à l'échelle du massif a demandé une réflexion sur le tracé des unités inférieures au minimum cartographique. Les petites unités présentant un type de faciès identiques ont été regroupées. La proximité d'unités de petite surface ayant un type de faciès différents ont été regroupées dans une unité complexe.

Les classes de pentes ont été définies en prenant en compte les contraintes exercées sur les arbres. Au-delà de 15°, l'exploitation est rendu difficile. Ces classes correspondent aux résultats publiés par Baize et Jabiol (1995).

L'échantillonnage par une méthode « linéaire » a été employé sur le large zone d'étude pour appréhender un gradient écologique. Le transect est un outil permettant la variabilité des sols (*Fritzsche et al., 2007*). Pour une zone d'étude étendue, comme les zones de références, la présence d'une macro-hétérogénéité peut être confirmée le long de cet axe. Les conditions climatiques et les aspects du paysage entraînent une pédogenèse différente. A l'intérieur de ces zones de référence, ce sont les transects qui permettent d'appréhender les variations de propriétés de sols qui faut replacer ensuite dans le contexte global de la zone de référence.

Typologie des unités complexes de sols (UCS)

Les résultats ont montré que les propriétés pédologiques correspondent avec la typologie et la diversité des sols franc-comtois (*CUER, 1985*). La description des sols par l'indice morpho-édaphique (*Bruckert, 1989*) a permis d'appréhender la diversité pédologique du massif, conditionnée par le substrat géologique et la pente (*Bruckert et Gaiffe, 1990*). Sur les pentes fortes, les sols superficiels, calciques ou calcaires, ont été décrits. En situation plane, les sols étaient de profondeur plus importante avec avec une majorité de sols brunifiés.

Les points de comparaison pour une carte de ce type n'est pas aisé. Toutefois l'INRA a publié des cartes pédologiques au 1/100000. L'examen des cartes de Dijon (*Chrétien, 1976*) et de Montpellier (*Arnal, 1985*) montre que le degré de précision de l'étude des calcaires du Jura est conforme aux cartes publiées. Les notices ne précisent pas la

proportion de la diversité de chaque unité. Ces unités sont considérées comme homogènes en termes de sol.

De nombreux paramètres conditionnent la présence d'un sol donné, faisant évoluer la diversité dans tel ou tel contexte. Il a été relevé que la pente jouait un rôle sur la typologie du sol mais également sur la variabilité de la nature des sigles présents. En effet, les résultats ont montré une réduction de la diversité de sols avec l'accentuation de la pente. Dans le Massif du Jura cela est également en lien avec l'élévation de l'altitude. Ces deux paramètres primordiaux jouent un rôle important sur la typologie du sol. Les sols seront moins évolués puisque rajeunis constamment. Ce cas est peu répandu sauf dans le sud du massif. D'après Blondé (1989), il existe une relation entre le caractère plus ou moins humifère des sols et le degré de fracturation des roches. De plus, il existe un lien entre les systèmes drainants (et hyperdrainants) et les flux hydriques. Ces derniers sont intenses limitant la capacité des arbres à utiliser l'eau du sol. Cela est confirmé par Gras (1994) ainsi que par Zhu et Shao (2006) pour qui la présence des éléments grossiers entraîne des modifications des propriétés physiques des sols et sur les mécanismes d'infiltration de la pluie (infiltration maximale pour un taux de cailloux de 10 %). Wang et Shao (2006) ont montré que la taille et la forme des cailloux influençaient le taux d'infiltration (effet positif pour les cailloux d'un diamètre supérieur à 25 mm). La présence des éléments grossiers, appréhendée par l'indice de pierrosité et intégrée au sigle morpho-édaphique permet la mise en relation de la morphologie du système racinaire des arbres avec les différentes contraintes (volume de la pierrosité, taille et forme des cailloux) liées à la présence des éléments grossiers (Lucot, 1990).

La diversité relevée sur les zones de référence 1 et 2 est plus importante que pour les zones de référence du sud du massif. La gamme de d'échantillonnage a été plus large pour ces zones, ainsi que le nombre de transects, ce qui explique cette différence.

Les résultats ont montré que les sols décrits présentaient une réserve utile en eau plutôt modeste. En effet, la texture équilibrée qui possède une bonne réserve utile (2,4 mm), est limitée par le volume de sol prospectable et la faible profondeur du sol. L'accès aux nutriments minéraux issus de la roche sous-jacente est plus aisée grâce à la présence de cailloux calcaires ou d'un banc à faible profondeur.

Les obstacles limitant le volume de sol sont également en lien avec le contexte calcaire. Les sols forestiers qui ne présentent pas de calcaires dans les premières dizaines de centimètres sont profonds avec des textures soit dominées par les argiles (lessivage en profondeur) soit dominées par les limons (dépôts éoliens). La présence d'un obstacle réduit généralement le profil à un seul horizon. Cela est en accord avec Bruckert et Gaiffe (1980) pour qui, au sein du massif jurassien et son contexte calcaire, les sols caillouteux sont fréquemment rencontrés. Il a été montré par Gras (1994) que la pierrosité du sol est un facteur important qui conditionne les propriétés du sol en jouant tantôt un rôle positif, tantôt un rôle négatif. La nature des cailloux (porosité, taille, forme) entraîne des modifications dans les mouvements d'eau et la réserve utile du sol.

Les résultats ont montré que la CERU est un indice édaphique intégrateur. Elle a permis la comparaison relative des transects d'étude et le classement du contenu des différentes unités topo-géologiques. Cet indice étant en partie basé sur la profondeur, les sols jurassiens présentent une gamme de CERU peu étendue, accentuée par la qualité minérale des sols du massif. Il existe une relation entre la CERU et l'altitude. En effet, l'accentuation de l'altitude ne réduit pas seulement la diversité des types de sols décrits

mais également leur profondeur moyenne. Il en résulte des CERU plus faibles. Tout comme la variabilité de sols, l'augmentation de la pente entraîne une baisse de la diversité des CERU calculée en altitude. Cela serait en lien avec la proportion de sols superficiels (volume plus faible) qui augmente en altitude, par rapport aux autres types de sols.

La différence mise en évidence entre les zones de référence est expliquée par les différences d'altitude mais également de types de substrats. En effet, le choix des zones de référence a pour but de décrire les différences altitudinales et Nord-Sud des propriétés écologiques. L'analyse des CERU par zone de référence a toutefois montré qu'il existe une différence entre altitudes basses et moyennes des zones 3 et 4 par rapport à celles des zones de références 1 et 2. En comparant les pentes des quatre zones de référence, les zones 3 et 4 présentent une proportion de pentes moyennes à fortes plus importantes que les zones 1 et 2, ce qui pourrait expliquer la différence de CERU entre ces secteurs de référence.

Les tests statistiques ont montré que les étages J1 (ZR1), J6 et J7 (ZR 1 et 2) s'individualisent significativement par rapport autres étages. De plus, pour les étages J1 et J7, il existe une différence significative entre zone de référence. J1 présente une différence entre les ZR de référence 1 et 2 alors que J7 présente une différence entre la ZR 3-4 et les zones 1 et 2. La variabilité de faciès du complexe marno-calcaire est la cause de cette différence, à laquelle s'ajoutent la pente et l'altitude, modifiant ainsi les paramètres du sol. Les arbres de classification apportent une information supplémentaire à la mise en évidence des liens entre étages géologiques. Les sols profonds sur marnes (J4 principalement) s'individualisent nettement par rapport aux autres étages. L'étage J1 de la zone de référence possède des propriétés proches de des sols sur marnes, laissant présager un complexe marno-calcaire composé ou des sols profonds.

A l'échelle du massif, les unités représentent la diversité des sols forestiers. A l'échelle du massif dans son ensemble, raisonner en unités homogènes ne signifie pas avoir des unités mono-typologiques, représentées par un seul type de sol. Cette cartographie, avait pour but de cartographier les propriétés des sols en appréhendant leur variabilité. Le traitement des données a montré que l'hétérogénéité du sol est très locale.

Le sud du massif jurassien est caractérisé par de fortes pentes. Il a été montré que la diversité des types de sol diminuait avec l'accentuation de la pente. Cependant, les unités de sols y sont plus nombreuses mais de surface plus faible.

Une majorité des sols sont superficiels compte tenu de leur développement sur le calcaire ou par une contrainte "cailloux" très fréquente. Cependant certaines unités présentent des sols plus profonds (alluvions, marnes (sur pentes faibles)). Il s'agit d'unités faiblement représentées en terme de surface. Les ensembles marneux les plus fréquents sont présents dans le nord du massif. Le reste des unités peuvent être considérées comme superficielles. Les unités 11 et 12 sur le complexe marno-calcaire, présentent plusieurs typologies de sol profonds (en proportion faible toutefois). Ces deux unités sont fortement représentées sur toute la surface du massif. Les probabilités de rencontrer un sol plus profond sont tout même importantes mais très localisées.

Les sols sont majoritairement argileux ou de texture équilibrée. Cela est en lien avec la nature de la roche originelle. Les différences de pédogenèse et de roches entraînent des variantes de textures selon un gradient limoneux. Les unités 11 et 12, sur le complexe marno-calcaire, présente une proportion non négligeable de sols limoneux et compte-tenu de la représentation importante de cette unité au sein du massif on peut dire qu'il s'agit de

types de sols importants.

Le pH du sol est fortement lié à sa texture et à la nature de la roche sous-jacente. La présence de sols argileux à équilibrés montre que les sols sont riches et cela sur l'ensemble du massif. La proportion de sols limoneux plus pauvres est toutefois non-négligeable puisque malgré une présence très localisée, se retrouve à de nombreux endroits sur toute l'étendue du massif jurassien.

La réserve utile est liée à la texture et à la profondeur du sol. Le caractère superficiel et le taux d'argile important ne permet pas à la majorité des sols du massif de stocker une réserve en eau importante. Seules les situations avec une profondeur importante et une texture équilibrée à limoneuse présentent une RU plus importante. Les pentes plus faibles permettent à ces sols de se développer. C'est donc dans les altitudes les plus basses que la probabilité de les rencontrer est plus importante.

Cet indice synthétique prend en compte le volume propectable et la nutrition minérale et hydrique. La CERU la plus importante est mesurée pour un sol relativement profond et de texture équilibrée. Les unités 8 et 9 présentent la plus grande proportion de sols ayant une CERU élevée. A l'inverse, les sols de pentes fortes, superficiels et argileux présentent une CERU la plus faible (unités 10 et 13).

Il est intéressant de noter que les deux paramètres que sont la réserve utile et la CERU, sont relativement proches. Ils sont tout deux dépendants de la texture (prenant en compte le taux de matière organique) et de la profondeur du sol. Cependant, la CERU est calculée sur la distance qui définit le transect d'étude. La conversion en un volume pourrait permettre un parallèle avec la RU d'un profil, rapporté à un volume de sol. Toutefois, la CERU a été calculée à partir de classes de profondeur et sa précision est seulement de 10 cm.

La proportion de sols humifères est plus importante pour les altitudes les plus importantes. Cette caractéristique est fortement liée à l'intensité de la pente (qui croît en proportion avec l'altitude). L'effet du climat en altitude peut également avoir un effet sur le recyclage de la matière organique. La présence de calcaire dur et pur (cas des lapiez) peut entraîner la formation de sol très humifère.

La connaissance des propriétés des sols permet de comprendre la répartition des arbres et les contraintes qui peuvent s'exercer.

Les paramètres du sol ont un rôle sur la régénération des sapins (*Bonvicini, 1983 ; Tan, 1983*). Les sols décrits sont de type brunifié comme la majorité de ceux qui ont été décrits lors de l'étude. Un pH faible limiterait la croissance des résineux cependant le contexte calcaire laisse présager la présence de sols riches bénéfiques aux arbres du point de vue de la nutrition.

L'élaboration de la carte des sols forestiers a également permis de mettre en évidence la configuration complexe des microclimats du massif, conséquence de la topographie. Le pédo-climat est un facteur important de la régénération et de la croissance des sapins (*Devine et Harrington, 2007*). Les conditions optimales se situent sur un sol brun à pellicule calcaire, en bordure de doline (propriétés physiques excellentes).

Les sols forestiers diffèrent peu des autres sols (d'un point de vue pédo-génétique) mais présentent une acidité plus importante (*Badeau et al., 1999*).

La compréhension des paramètres pédologiques est primordiale dans la croissance des arbres. La profondeur et la nature de l'obstacle joue un rôle dans l'assise mécanique et le développement du système racinaire. Les résultats ont montré une proportion importante de sols superficiels dans les unités les plus représentées. De plus, la texture conditionne la réserve utile du sol et la nature de la roche, sa nutrition minérale. Les résultats ont montré que la texture et le pH des sols jurassiens sont positifs pour la croissance, dans le contexte jurassien. Cependant, la profondeur peu importante des sols entraîne une chute de la réserve utile (compensée par les précipitations abondantes). D'après Le Tacon (1976), la présence de carbonate de calcium dans le sol (lié au taux de matière organique) peut entraîner des difficultés de croissance chez de nombreuses espèces de résineux forestières. Comme l'épicéa est une essence sensible à la présence de calcaire, un sol trop riche entraîne une baisse de la production sauf dans le cas où il n'y a pas de déficit hydrique.

Validité de la Démarche

La démarche de cartographie des propriétés des sols s'appuie sur l'étude de quatre zones de référence. En effet, l'étendue du massif du Jura ne permet pas une étude exhaustive des unités cartographiques. Cette méthodologie de secteurs de référence a été régulièrement employée (Monnet, 1996 ; Legros, 1996 ; Thomas et al., 1999 ; Lagacherie et Voltz, 2000). La finalité est de représenter les unités cartographiques de la façon la plus satisfaisante possible.

L'échelle de travail correspond à la problématique et au contexte jurassien. Il n'existe pas d'échelle parfaite pour la prédiction des sols sans tenir compte du contexte d'étude (Claessens et al., 2005). Le choix de l'échelle s'est donc porté sur le 1/50000 pour les zones de référence puisqu'il s'agissait de la plus grande précision proposée par les cartes de BRGM. L'échelle du massif a été sélectionnée en accord avec les programmes de cartographie des sols en cours, comme le programme IGCS de l'INRA, c'est à dire au 1/250000. La variabilité pédo-paysagique sera influencée par le choix de l'échelle d'étude (Phillips, 2001 ; Carre, 2002 ; Garten et al., 2007). Par sa démarche, cette étude s'est penchée sur les effets du changement d'échelle sur les paramètres intégrés des sols forestiers et leur répartition spatiale.

5. Conclusion.

L'information géologique a été numérisée selon 7 unités de faciès dominant (UG) et l'information topographique a été spatialisée selon 3 classes de pentes (UT). La combinaison de ces deux couches d'information a permis de découper les zones de référence, puis le massif dans son ensemble, en unités topo-géologiques (UTG).

Au sein des zones de référence (ZR), les sols ont été décrits par le sigle morpho-édaphique, le long de transects. Ces données ont été analysées grâce à la mise au point d'un indice synthétique, combinant le volume prospectable et la nutrition hydrique et minérale (CERU).

L'analyse de données a permis d'attribuer une probabilité de présence d'un type de sol au sein des UTG. Cette information a été spatialisée selon 13 unités complexes de sols (UCS).

Les UCS ont ensuite été élargies des zones de référence vers l'ensemble du massif en fonction des UTG pour donner la carte des complexes de sols forestiers du Massif du Jura.

Les sols se développent principalement sur des complexes calcaires ou marno-calcaires. Ils se caractérisent par une superficialité marquée et une teneur en argiles relativement importante. Il s'agit de sols riches avec une réserve utile relativement faible, compensée par les précipitations abondantes tout au long de l'année.

Ce chapitre a également permis de préparer la sélection de stations où les paramètres écologiques pourront être étudiés à une échelle très fine (*cf. Chapitre 4*). La variabilité locale du climat et des propriétés des sols pourra être mis en relation avec les arbres se développant au sein de ces stations.

Chapitre 4 : Phase 2 - Etude stationnelle

1. Introduction.

Ce chapitre montre le degré d'influence des différents paramètres stationnels et individuels sur la densité du bois (Figure 4.1).

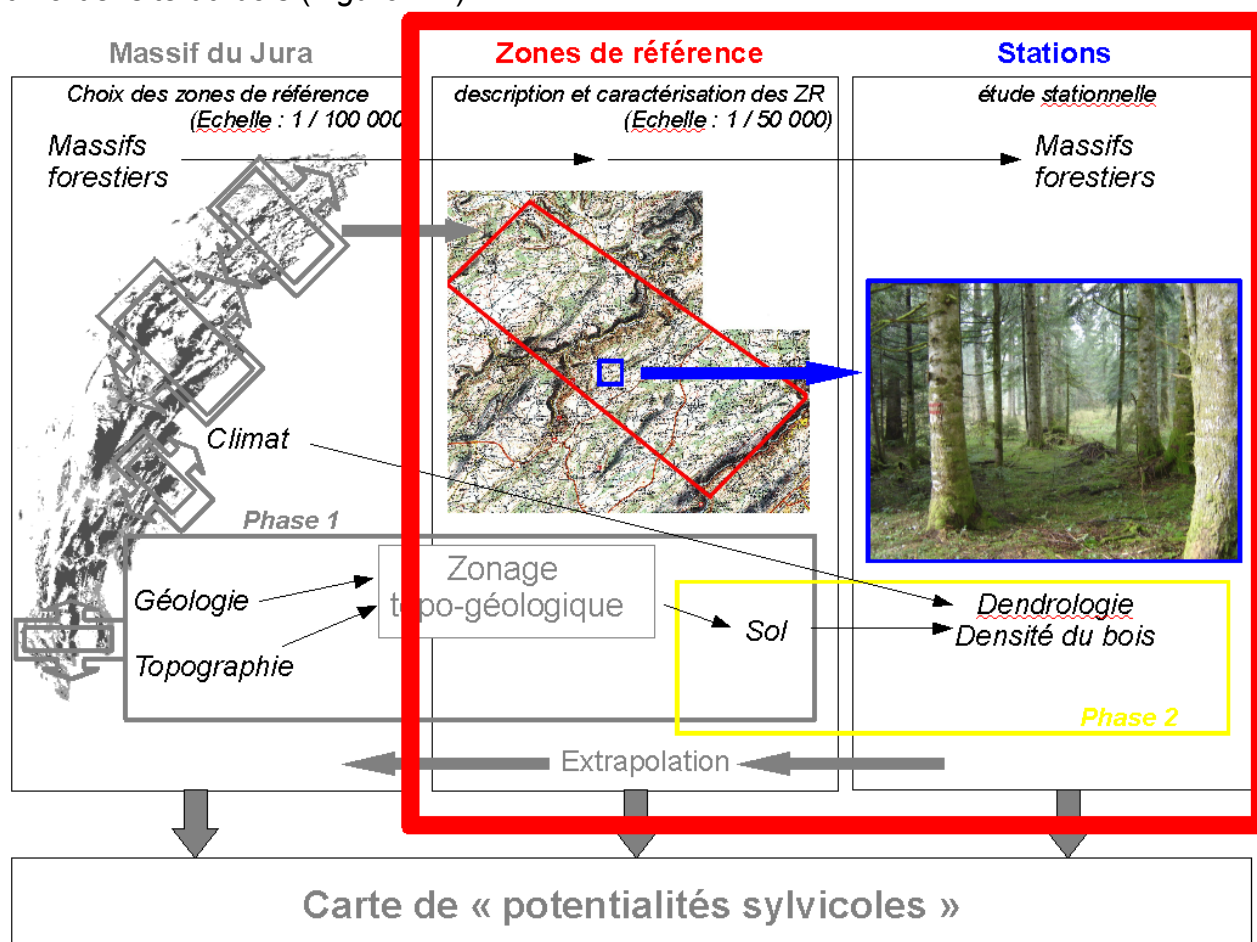


Figure 4.1. Schéma de la démarche générale, mettant l'accent sur la phase 2 de l'étude.

Bert (1993) a étudié l'influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance de *Abies alba*. Cette étude pluridisciplinaire a été principalement orientée sur l'influence de gestion du peuplement, par l'étude de la concurrence et ses conséquences sur la croissance des cernes de *Abies alba*. Les études couplant la densité du bois (paramètre représentatif des caractéristiques mécaniques) avec les paramètres stationnels sont rares (Gartner et al., 2002 ; Raiskila et al., 2006).

Cette étude a pour but d'apporter des connaissances sur l'influence des facteurs stationnels (altitude, volume de sol prospectable, pH et réserve utile) et individuels (espèce, hauteur, diamètre et volume de sol prospecté) sur la densité du bois (*Abies alba* et *Picea abies*). Les relations entre les paramètres intégrateurs des relations édaphiques « sol-arbre » doivent être mises en évidence sur 27 stations forestières, sélectionnées par la démarche cartographique du chapitre précédent et se diversifiant par leurs propriétés.

La variabilité des propriétés mécaniques du bois a été mise en relation avec de nombreux facteurs (climat, roche, sol, topographie...).

Les études traitant du climat (*Bert, 1993 ; Tuovinen, 2005 ; Andreassen et al., 2006 ; Korkalainen et Lauren, 2006 ; Devine et Harrington, 2007*) et de l'alimentation en eau (*Bert, 1993 ; Curt et al., 1996 ; Bergh et al., 1999*) ont montré une réponse de relation entre la densité et la largeur des cernes en fonction du climat et une influence forte des précipitations en juin et des températures en milieu d'hiver et de mars (Scandinavie, Alpes). La météorologie (précipitations et températures) de juin semble avoir une influence prépondérante sur la croissance (*Tuovinen, 2005 ; Andreassen et al., 2006*). La croissance est limitée par les précipitations en plaine et par la température pour les altitudes les plus élevées (conséquence directe sur la durée de la saison de végétation). Les facteurs climatiques liés au bilan hydrique, sont plus importants que la topographie et le sol. Il a également été montré que c'est l'altitude et la gestion du peuplement qui influencent principalement la croissance des cernes, par rapport à l'effet de la nutrition ou du sol. Les études prenant en compte la topographie (*Korkalainen et Lauren, 2006*), géologie (*Curt et Marsteau, 1997 ; Korkalainen et Lauren, 2006*), la nutrition et la richesse minérale (*Bert, 1993 ; Curt et Marsteau, 1997 ; Bergh et al., 1999 ; Sanchez-Rodriguez et al., 2002 ; Stendahl et al., 2002*), l'importance de la pierrosité (*Lucot et Gaiffe, 1995 ; Eriksson et Holmgren, 1996*) et le compartiment « sol » (*Curt et Marsteau, 1997*), ont montré des relations entre unités géo-pédologiques et croissance en hauteur. La « qualité » de la station (*Stendahl et al., 2002*) est influencée par la chimie et la minéralogie du sol avec une importance du calcaire actif (*Curt et Marsteau, 1997*). La profondeur du sol et la disponibilité des nutriments sont les facteurs les plus influents sur la nutrition et la croissance (*Sanchez-Rodriguez et al., 2002*). La production est meilleure sur les sols profonds et dépourvus de cailloux (grès, calcaires gréseux). La disponibilité de l'eau et des nutriments influence la productivité de l'épicéa (*Bergh et al., 1999*). Corona et al. (1998) ont analysé l'influence de l'ensemble de ces paramètres. D'après les auteurs cités précédemment, cinq facteurs influencent, positivement (+) ou négativement (-), la qualité du bois de manière significative : les précipitations annuelles (+), le taux d'argile (-), l'orientation vers l'ouest (+), le taux de carbonate de calcium (-) et le drainage (+). Les études qui prennent en compte la profondeur du sol sont peu nombreuses. Les facteurs de l'environnement qui influencent la croissance des arbres, ont été étudiés selon diverses échelles (globale à individuelle). Beaucoup d'études ont montré l'importance des facteurs de la station par rapport aux facteurs tels que le climat ou la géomorphologie. Si dans la littérature les paramètres édaphiques sont bien étudiés, l'étude à l'échelle de l'arbre est rare. Bert (1993) a étudié l'influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance de *Abies alba*. Cette étude porte sur l'influence de gestion du peuplement, par l'étude de la concurrence et ses conséquences sur la croissance des cernes. Les études couplant la densité du bois (paramètre représentatif des caractéristiques mécaniques) avec les paramètres stationnels sont rares (*Gartner et al., 2002 ; Raiskila et al., 2006*). Il existe un manque de connaissance sur les relations entre propriétés mécaniques du bois et les facteurs stationnels.

Les objectifs de cette étude sont d'étudier des paramètres intégrés et robustes qui reflètent la vie de l'arbre. Ainsi, il devient possible de mettre en rapport la densité du bois et la croissance du peuplement avec le climat, l'altitude et le sol.

2. Choix des stations.

Afin de préciser la nature des paramètres écologiques et leur rôle dans la production forestière, il est nécessaire de réaliser une étude à une échelle très locale.

Les stations doivent être représentatives de l'ensemble du massif. Sur des transects « types », le choix de plusieurs stations a été fait en fonction du nombre de sigles décrits (*cf. chapitre 3*). Il faut tenir compte de la redondance des sigles sur le même étage géologique. L'objectif majeur est de décrire le plus possible des situations les plus représentées à l'échelle du massif.

Le contexte géologique franc-comtois est dominé par les calcaires sous forme de bancs ou bien de cailloutis. Le choix de stations devra se faire en tenant compte de ces proportions. L'absence d'obstacle montre que les sols les plus profonds ne sont pas à négliger. Toutefois, les résultats ont confirmé le caractère superficiel des sols forestiers et la réduction du deuxième horizon au-dessus de l'obstacle. Le développement des horizons au contact ou entre l'obstacle entraîne des contraintes importantes pour le développement du système racinaire des arbres.

Pour sélectionner les différentes stations, deux approches complémentaires ont été réalisées (*Figure 4.2*).

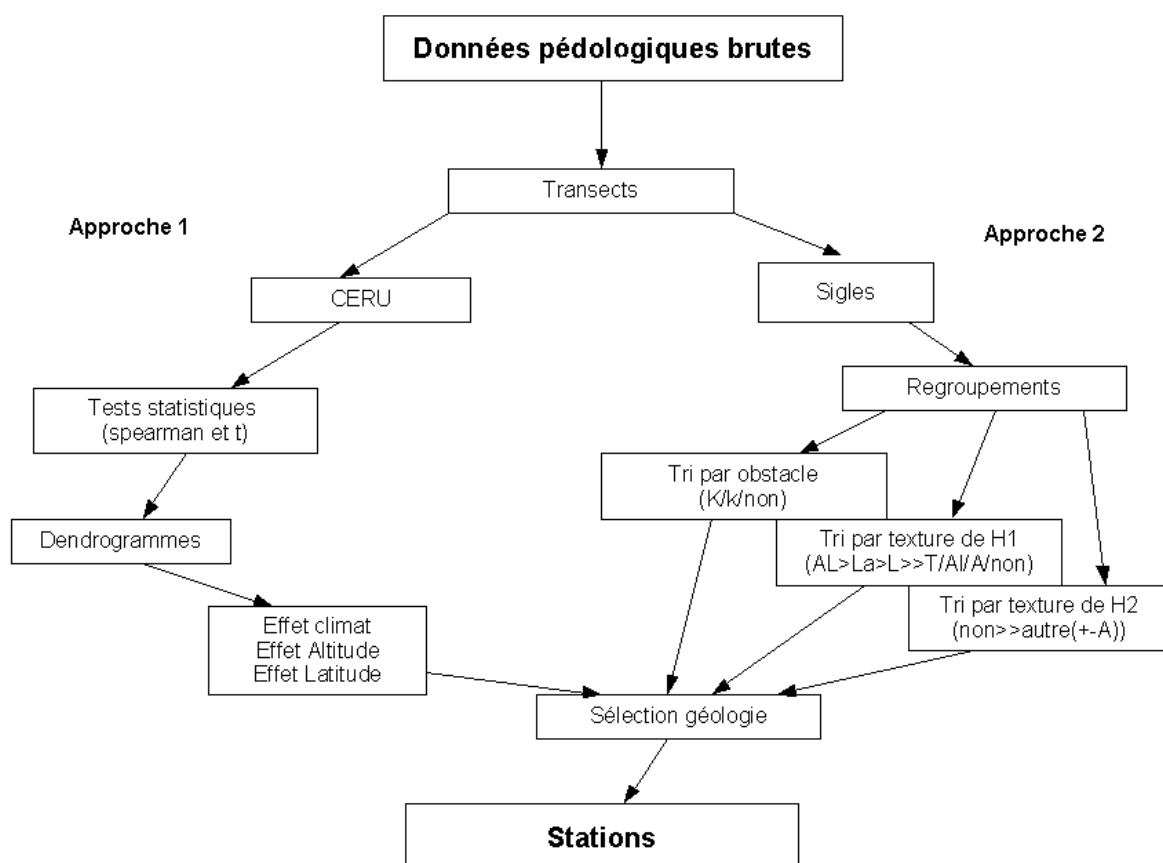


Figure 4.2. Traitement des données brutes « sols » dans le but de sélectionner les stations d'étude.

Approche 1

De grands ensembles géographiques (latitude et altitude) ont été mis en évidence en fonction des tests statistiques et de leurs résultats significatifs (*cf. chapitre 3*). Des tests de rangs de Spearman ont été réalisés en croisant la CERU du transect avec l'altitude et la ZR. Le faciès de la roche et les étages les plus représentés ont été identifiées en s'appuyant sur les tests t de Student, entre les étages géologiques. Il est nécessaire de prendre en compte les types de pentes présentes dans chaque zone.

Les effets altitude et latitude ont été mis en évidence. Les stations devront se répartir au sein des différentes zones de référence, à des altitudes différentes.

La précision n'est pas suffisante car chaque station est susceptible de présenter plusieurs sigles morpho-édaphiques.

Approche 2

Les sigles ont été triés d'après la nature de l'obstacle, la profondeur et la pente pour rendre la lecture des données plus aisée.

Des regroupements ont été effectués dans les classes de pentes et les classes de profondeurs (*cf. chapitre 3*).

Il existe une très grande diversité de sigles et de CERU pour un type d'obstacle donné. Cependant, deux types d'obstacles les plus représentés sont les bancs calcaires et les cailloux calcaires. Il est nécessaire de tenir compte des sols qui n'ont pas présenté d'obstacle puisque leur proportion n'est pas négligeable. Les textures de ces sols varient, principalement, de limoneux (L) à argilo-limoneux (Al).

L'histogramme des CERU en fonction de l'obstacle (*Figure 4.2*), a montré que la CERU augmente avec la profondeur. Cependant, cette approche ne suffit pas pour choisir les stations d'étude.

Synthèse des approches

Grace à la combinaison des informations des deux approches, en tenant compte de l'effet altitude, des différences de contexte géologique et les tris des sigles, 27 stations ont été retenues (sur 37 identifiées initialement) (*Tableau 4.1*). Elles se situent principalement dans la zone de référence 1. Afin de mettre en évidence les potentielles différences nord-sud, des stations ont été sélectionnées sur les zones de référence 2 et 3.

Tableau 4.1. Sigle morpho-édaphique des stations sélectionnées (cf. chapitre 3).

Station	Sigle morpho-édaphique de référence
1	L.La.La/*4
2	AL/K2Lz30
3	AL.AL/*6
4	La.AL/K4
5	La/k2pLz30
6	AL/K1Lz30
7	La.AL/*3
9	L.L.AL/K3
10	L.La/k3p
11	La.AL.A/*4
12	L/k1p
13	L.La/k2Lz30
14	La.La/k2p
15	AL/k1p
18	AL/K2Lz30
19	La/k2p
20	AL.AL/K2
22	AL/k1p
23	L.La/k3
24	L.AL.A/O4
25	La/K2
26	L.La.AL/*4
29	La.AL.AL/K3
32	AL/K1Lz
34	La/k2p
98	AL/k2p
99	La/k2p

3. Matériel et méthodes.

3.1. Localisation et caractérisation des stations.

Les 27 stations sont localisées dans les zones de référence. Il n'y a pas de différence importante de l'exposition entre les stations. Elles possèdent une superficie de 25 ares (50 x 50 m), délimitée par les 4 piquets visibles. Le faciès de la roche, l'altitude, le mode de gestion sylvicole et le peuplement ont été inventoriés (*Figure 4.3 et Tableau 4.2*).

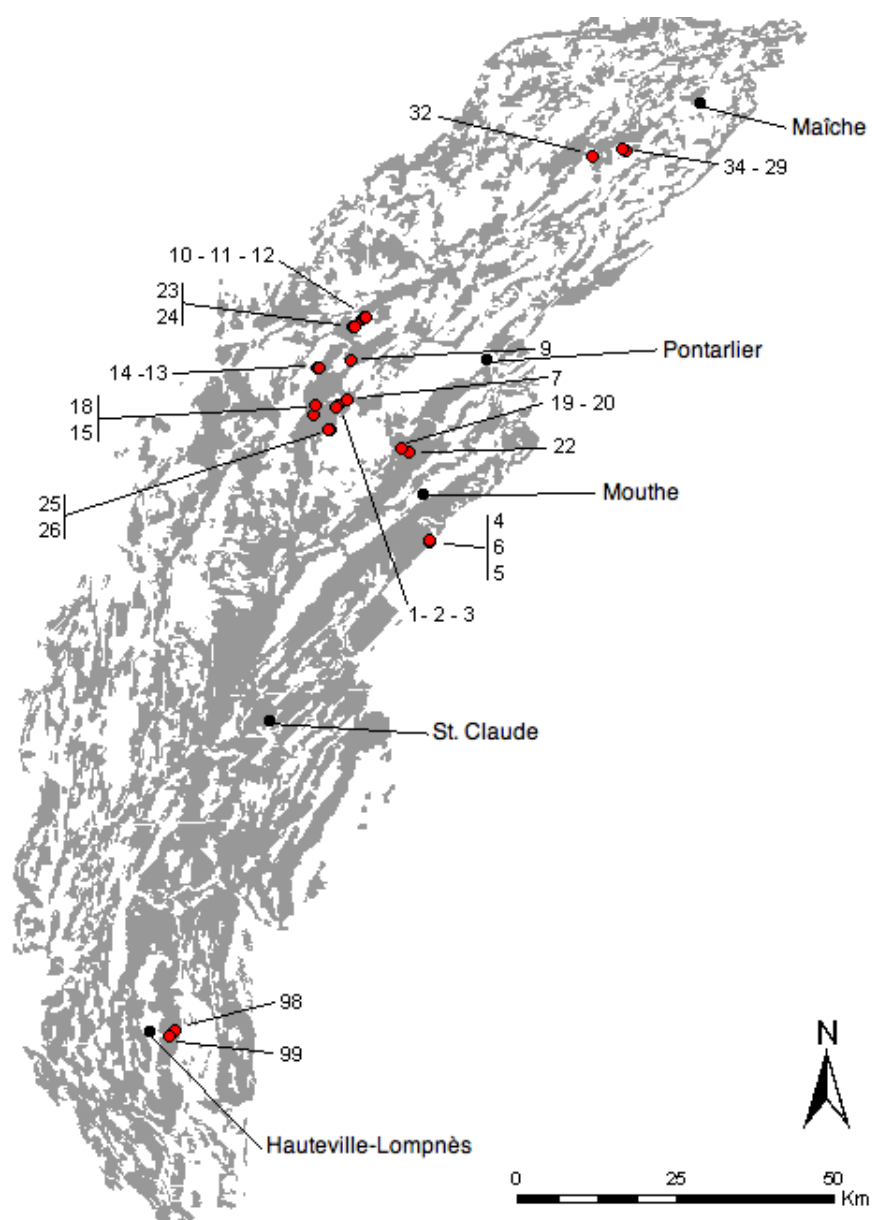


Figure 4.3. Localisation des 27 stations d'étude au sein du Massif du Jura.

3.2. Peuplement forestier.

Tableau 4.2. Caractéristiques des stations d'étude. Les 27 stations sont placées par altitude croissante. La « Géologie » représente un type de faciès géologique. La pente est définie selon deux classes (0-5° et 5-15°).

N° Station	Contexte géologique	Pente (°)	Altitude (m)	Typologie forestière	Mode de Gestion
S11	Calcaires (J5A)	0-5	660	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Millet avec Blechnum spicant (Milio-Fagetum blechnetosum)	Futaie régularisée
S12	Calcaires (J4-3b)	0-5	660	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Millet avec Blechnum spicant (Milio-Fagetum blechnetosum)	Futaie régularisée
S13	Calcaires (J5A)	0-5	670	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Millet avec Blechnum spicant (Milio-Fagetum blechnetosum)	Futaie régularisée
S14	Complexe marno-calcaire (J2)	0-5	670	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Dentaire typique (Dentario-Fagetum typicum)	Futaie régularisée
S15	Complexe marno-calcaire (J2)	0-5	680	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Dentaire avec Myrtille (Dentario-Fagetum vaccinetosum myrtilli)	Futaie régularisée
S16	Complexe marno-calcaire (J7)	0-5	710	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Dentaire typique (Dentario-Fagetum typicum)	Futaie régularisée
S17	Complexe marno-calcaire (J7)	0-5	710	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Dentaire typique (Dentario-Fagetum typicum)	Futaie régularisée
S18	Calcaires (J1c-2)	0-5	750	Sapinière – Hêtraie à Millet avec Pulmonaire (Milio-Fagetum pulmonarietosum)	Futaie jardinée
S19	Calcaires (J5A)	0-5	760	Sapinière – Hêtraie à Sapin avec Herbe-à-Robert (Abieti-Fagetum geranietosum robertiani)	Futaie régularisée
S20	Calcaires (J1c)	0-5	770	Sapinière – Hêtraie à Pulmonaire avec Herbe des sorcières (Pulmonario-Fagetum circaetosum lutetianae)	Futaie jardinée
S21	Calcaires (J1c)	0-5	820	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Sapin avec Herbe-à-Robert (Abieti-Fagetum geranietosum robertiani)	Futaie régularisée
S22	Calcaires (J1c)	0-5	820	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Sapin avec Herbe-à-Robert (Abieti-Fagetum geranietosum robertiani)	Futaie régularisée
S23	Calcaires (J1c)	0-5	820	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Millet typique (Milio-Fagetum typicum)	Futaie jardinée
S24	Calcaires (J8a)	0-5	830	Sapinière – Hêtraie à Millet avec Blechnum spicant (Milio-Fagetum blechnetosum)	Futaie régularisée
S25	Calcaires (J6)	0-5	850	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Sapin typique, variante à gros blocs (Abieti-Fagetum typicum, variante à gros blocs)	Futaie régularisée
S26	Complexe marno-calcaire (J7)	0-5	860	Hêtraie-sapinière – Pessière à Asplénium, sur sol karstique (Asplenio-Piceetum, sur sol karstique)	Futaie jardinée
S27	Complexe marno-calcaire (J7)	0-5	870	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Millet avec Epiaire des forêts (Milio-Fagetum stachyetosum silvaticae)	Futaie jardinée
S28	Calcaires (J6)	5-15	910	Sapinière – Hêtraie à Dentaire typique (Dentario-Fagetum typicum)	Futaie régularisée
S29	Calcaires (J2)	5-15	911	Sapinière – Hêtraie à Dentaire avec Carex blanc (Dentario-Fagetum caricetosum albae)	Futaie jardinée
S30	Calcaires (J8b)	15-90	960	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Sapin typique (Abieti-Fagetum typicum)	Futaie régularisée
S31	Calcaires (J9)	0-5	960	Sapinière – Hêtraie à Sapin typique (Abieti-Fagetum typicum)	Futaie régularisée
S32	Calcaires (J9)	0-5	980	Sapinière – Hêtraie à Sapin typique (Abieti-Fagetum typicum)	Futaie régularisée
S33	Calcaires (J9)	5-15	1080	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Seslérie typique (Seslerio-Fagetum typicum)	Futaie jardinée
S34	Calcaires (J6b)	15-90	1120	Hêtraie-sapinière – Hêtraie à Sapin typique (Abieti-Fagetum typicum)	Futaie régularisée
S35	Complexe marno-calcaire (J8)	5-15	1310	Pessière – Hêtraie à Sapin avec Luzule des forêts (Abieti-Fagetum luzuletosum silvaticae)	Futaie jardinée
S36	Complexe marno-calcaire (J8)	5-15	1330	Pessière – Pessière à Asplénium (Asplenio-Piceetum)	Futaie jardinée
S37	Complexe marno-calcaire (J8)	5-15	1340	Pessière – Pessière à Asplénium, sur sol karstique (Asplenio-Piceetum, sur sol karstique)	Futaie jardinée

Remarque préliminaire : les mesures dendrométriques et de densité ont été réalisées au cours de deux sessions sur le terrain.

La première session de mesures a été réalisée selon le protocole qui suit, pour les 27 stations d'études.

La seconde session de mesures a été effectuée sur 10 stations (S2 / S3 / S4 / S6 / S10 / S11 / S13 / S14 / S25 / S26). Il s'agissait d'un complément de données. Les arbres ont été localisés au sein de la station et les hauteurs ont été mesurées systématiquement. Les mesures à l'aide du Sylvatest Duo® (CBS-CBT, 1998) ont été refaites sur les arbres mesurés lors de la première session.

Dendrométrie

Sur chaque arbre résineux de la station dont le diamètre est supérieur à 15 cm, des étiquettes numérotées ont été disposées. Cet étiquetage permet de localiser chaque arbre de façon précise dans la station à l'aide d'une grille (la prise de note est faite depuis le centre de la station ; *fiche de terrain en annexes*). Pour chaque arbre recensé, son genre et son espèce ont été déterminés (*Rameau et al., 1993*). De plus, les espèces herbacées indicatrices ont été recensées afin de déterminer le type de station forestière (*Burnand et al., 1998 ; fiche de terrain en annexes*). Le diamètre (d) des arbres étiquetés a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse (incertitude : $d \pm 10$ cm).

La hauteur (h) des arbres a été mesurée à l'aide d'un dendromètre (*Blum Leiss®*), pour les cimes visibles. Cette manipulation est réalisée à deux expérimentateurs, un restant au pied de l'arbre (profitant pour mesurer le diamètre) et le second se déplaçant en tenant le décamètre (incertitude : $h \pm 1$ m).

Mesure de la densité du bois

Avant de débiter la première session de mesures, le protocole a été expérimenté sur deux stations (S12 et S26) afin de définir le nombre de mesures à réaliser sur chaque arbre.

La densité du bois sur pied a été mesurée par des mesures ultras-soniques, réalisées à l'aide d'un appareil Sylvatest Duo® (CBS-CBT, 1998) (*Sandoz, 1993 ; Sandoz, 1996 ; Sandoz et al., 2000 ; Chauhan et Walker, 2006 ; Bütler et al., 2007*).

Le principe de mesure repose sur la relation entre la vitesse du son et la densité du bois (*Guillot et al., 1996*).

$$V_R^2 = C_R/d = E_R/d$$

V_R : radial ultrasonic speed

C_R : rigidity term of the radial axis

E_R : elasticity modulus of the radial axis wood density

d : wood density

Les mesures ont été effectuées sur 10 arbres « représentatifs » de la station (taille moyenne, forme régulière du tronc, état sanitaire général). La préparation des trous

nécessite quelques précautions. Les contraintes sont limitées pour les mesures radiales car les trous sont perpendiculaires au tronc. Les sondes sont diamétralement opposées. Les ondes traversent ainsi un maximum de cernes, ce qui atténue les effets des variabilités climatiques inter-annuelles. Pour les mesures longitudinales, les trous doivent être orientés vers l'intérieur, avec un angle inférieur à 40° . Les trous sont percés avec le foret spécial livré avec le *Sylvatest Duo*[®] et une perceuse autonome.

Après la session de mesures exploratoire, il a été décidé de réaliser une mesure longitudinale et une mesure transversale par arbre sélectionné (*Figures 4.4a et 4.4b*). Le *Sylvatest Duo*[®] mesure le temps (en microsecondes) que mettent les ondes entre les 2 électrodes. Lors de la mesure transversale, il est nécessaire de mesurer l'écartement des sondes (le sillon sur les sondes sert de repère), afin d'obtenir une mesure de vitesse, exprimée ensuite en mètre par seconde. En ce qui concerne la mesure longitudinale, un guide de 1,5 m a été utilisé pour effectuer la mesure. Le diamètre de l'arbre avec le pied à coulisse a été mesuré avant d'appliquer le cicatrisant en mastic (*fiche de terrain en annexes*).



Figures 4.4a et 4.4b. Mesures radiale (a) et longitudinale (b) au Sylvatest Duo[®].

Volume de sol par arbre

Le volume de sol prospectable (vsi) par les systèmes racinaires a été estimé. A l'échelle de la station, il s'agit de la somme des valeurs en 3-dimensions de chaque "pixel" de la station. Pour chaque arbre, 4 valeurs de profondeur ont été relevées aux 4 points cardinaux, à environ 1,5 m du tronc de l'arbre.

Le traitement des données a été réalisé à deux échelles : stationnelle et individuelle. Le *Sylvatest Duo*[®] ne donnant qu'une valeur de temps entre les électrodes, la vitesse a été

calculée pour les ultrasons. Les moyennes et les écarts types ont été calculés sur les vitesses longitudinales et transversales. Il est nécessaire de séparer ces deux types de mesures pour les traitements. Des graphes ont été réalisés pour croiser les différents paramètres de la station et des arbres. Des tests statistiques (Kruskal-Wallis) ont été employés pour faire des comparaisons de stations 2 à 2.

Les vitesses sont représentées par rapport au diamètre et à la hauteur des arbres échantillonnés.

Les vitesses sont également représentées de façon graphique par rapport aux paramètres stationnels (vsi = volume de sol individuel, a = altitude, h = hétérogénéité, s = station, ph = pH_{eau} mesuré dans les 60 premiers centimètres du profil), pour les 10 stations d'étude de la seconde série de données.

3.3. Étude détaillée du sol.

L'étude de la couverture pédologique permet la mise en évidence de la disponibilité de l'eau et des nutriments ainsi que les contraintes s'exerçant sur l'arbre.

3.3.1. Cartographie systématique de la profondeur du sol.

La profondeur du sol de chaque station a été cartographiée suivant un échantillonnage systématique avec une maille de 5 m sur une surface de 2500 m². Le matériel employé se compose d'une boussole, d'un topo-fil et d'un « pénétromètre » (tarière fine, facile à insérer dans le sol). A l'aide d'un topo-fil et d'une boussole, la station de 50 m de côté a été matérialisée avec 4 piquets. Les mesures sont ensuite effectuées avec un pas de 5 m. Le pénétromètre a été utilisé pour atteindre la roche ou tout obstacle présent. La profondeur maximale mesurée est 80 cm. Le logiciel *Sigmaplot 9* a été utilisé afin de réaliser une carte de profondeur en 3-dimensions.

L'hétérogénéité de la station est estimée (*Figure 4.4*). Pour chaque pixel du relevé systématique, la somme des écarts de profondeur de ses 8 pixels voisins est calculée puis divisée par 8. La moyenne des 64 valeurs obtenues est calculée et représente l'indice d'hétérogénéité de la profondeur sur la station. Plus l'indice est élevé et plus la station présente des variations de profondeur importantes d'un pixel à un autre.

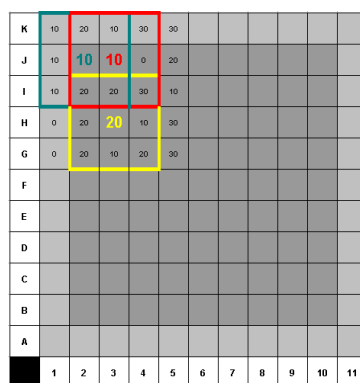


Figure 4.4. Schéma explicatif du calcul de l'indice d'hétérogénéité.

3.3.2. Description du sol.

Le profil de sol le plus représentatif de la station et la roche sous-jacente (lorsqu'elle est présente à moins de 1,5 m de profondeur) ont été décrits à partir d'une fosse (*Figures 4.5a et 4.5b*). Elle a été réalisée manuellement. Idéalement, la fosse doit atteindre la roche mère. Cependant, il n'a pas toujours été possible d'atteindre cette dernière. La roche sous-jacente a été décrite et le système de sub-surface a été déterminé. Des échantillons de roches ont été prélevés pour d'éventuelles analyses complémentaires et l'étude plus fine de faciès.

Le profil pédologique est décrit de façon classique (*Baize et Jabiol, 1995 ; Duchaufour, 2001*). Une fiche de terrain (*fiche de terrain en annexes*) permet de décrire les descripteurs du sol en lien avec les arbres :



Figures 4.5a et 4.5b. Réalisation d'une fosse pédologique.

Les types de sol ont été donnés selon la classification internationale FAO-WRB (1998) et le référentiel pédologique français (*Baize et Girard, 1995*). De plus, le sigle morpho-édaphique adapté a été mentionné (*cf. chapitre 3*).

La pierrosité a été mesurée selon la méthode de Lucot et Gaiffe (1995). Les éléments grossiers ont été prélevés par tranche de sol (15 cm) à partir d'une fosse de 0,5 m de côté. Leur volume a été mesuré par déplacement d'eau ou par mesure des dimensions lorsqu'ils ne peuvent être prélevés. Plus précisément (*Figures 6a, 6b et 6c*), les éléments grossiers ont été introduit dans un seau (6,25 L) rempli d'eau à raz-bord. L'eau qui s'écoule du seau est récupérée dans une bassine puis son volume est mesuré à l'aide d'une éprouvette graduée de 250 mL. Les cailloux de grande taille sont mesurés à l'aide d'un mètre à ruban en rapportant leur forme à une forme géométrique connue. Lorsque des cailloux ne peuvent être retirés de la fosse, on estime le volume occupé par ces derniers dans la fosse.



Figures 4.6a, 4.6b et 4.6c. Mesure de la pierrosité. Les éléments grossiers qui sont extraits de la fosse sont introduit dans le seau rempli d'eau. L'eau qui déborde est récupérée dans la bassine et son volume est mesuré.

Pour terminer, un échantillon de sol a été prélevé pour chaque horizon afin de faire les analyses en laboratoire (pH, granulométrie, perte au feu, humidité).

3.3.3. Analyses en laboratoire.

Sur les 27 stations étudiées, 48 échantillons, représentant les différents horizons des sols décrits sur le terrain. Chaque horizon échantillonné a été analysé pour déterminer le $pH_{eau/KCl}$, le taux de matière organique et la granulométrie. Ces analyses sont réalisées suivant les protocoles standardisés (AFNOR, 1996).

Mesure du taux d'humidité

Le taux d'humidité de l'échantillon est exprimé selon la formule suivante :

$$MF = MS + ME$$

$$TE = 100 (MF - MS) / MF$$

Mesure du taux de matière organique

Le taux de matière organique est évalué par une mesure de la quantité de carbone contenue dans l'échantillon de sol (Baize, 1988 ; Pansu & Gautheyrou, 2003).

Mesures de pH

Chaque échantillon est caractérisé par 2 mesures de pH : le pH_{eau} et le pH_{KCl} (AFNOR, 1996).

Analyse granulométrique

Cette étape permet de connaître la texture précise d'un échantillon de sol. Cette mesure a été réalisée par la méthode la "Pipette Robinson-Köhn ou Andreasen" (Pansu et Gautheyrou, 2006).

Une fois la granulométrie achevée, il est possible d'estimer la réserve utile pour chaque profil, chaque station et chaque arbre, à l'aide de la profondeur, de la texture et la pierrosité (Curt et al., 2001).

3.4. Suivi climatique.

Le climat étant un facteur important de la caractérisation d'un terroir, les températures (atmosphère et sol) ont été suivies.

Des enregistreurs météorologiques (*Hobo ProSeries Temp/Ext Temp, Hobo®*), mesurant la température, ont été installés dans 18 stations de référence (station 2/4/5/7/9/10/11/13/14/15/18/20/22/24/25/29/32/34), représentant des situations particulières. Elles ont été activées le 20 décembre 2006 à 0 h avec un pas de temps de 6 h entre les mesures. Elles ont été fixées à la base d'un arbre et le capteur externe est placé dans le sol, entre 25 et 30 cm de profondeur. Afin de limiter le vol ou la dégradation du matériel, un grillage plastique de couleur verte a été fixé par dessus les sondes, afin de les camoufler. (Figures 4.7a et 4.7b).



Figures 4.7a et 4.7b. Enregistreur de température Hobo® à sonde double (atmosphérique et sol). Il est fixé au pied du tronc de l'arbre puis dissimulé par un grillage en plastique souple. Le câble de la sonde externe est introduite dans le sol.

4. Résultats.

4.1. Sol.

Tableau 4.3. Propriétés des sols des stations d'étude. s : station ; pm : profondeur moyenne ; pma : profondeur maximale ; pmi : profondeur minimale ; h : indice d'hétérogénéité calculé ; vs : estimation du volume de sol total ; ts : typologie du sol ; ph : pH moyen mesuré sur les 60 premiers centimètres du profil ; t : texture dominante du profil (AL : argilo-limoneuse, Al : argileuse faiblement limoneuse, La : limono- faiblement argileuse, L : limoneuse) ; mo : taux de matière organique dans l'horizon A1 ; rust : réserve utile stationnelle (rapportée à 1 m²).

s	pm (cm)	pma (cm)	pmi (cm)	h	vs (m ³)	ts	ph	t	m (%)	rust (mm)
S1	21	70	5	8	514	Sol brun lessivé	5,3	AL	11	43
S2	15	80	0	13	370	Sol brun à pellicule calcaire	6,4	AL	29	24
S3	20	75	0	13	496	Sol brun lessivé	5,4	Al	11	52
S4	21	60	10	9	518	Sol brun eutrophe humifère	6,7	AL	31	46
S5	11	40	0	8	266	Sol brun mésotrophe	4,4	La	15	28
S6	16	80	0	13	394	Sol lithocalcique	4,8	AL	91	17
S7	25	80	5	18	619	Sol brun eutrophe	5,1	Al	11	51
S9	29	80	5	18	720	Sol brun mésotrophe à pseudogley	6,0	La	6	59
S10	16	30	5	7	411	Sol brun eutrophe à pseudogley	5,1	AL	6	36
S11	59	80	15	3	1478	Sol brun lessivé	4,8	AL	7	105
S12	11	80	5	6	276	Sol brun eutrophe à pseudogley	5,3	AL	3	33
S13	11	35	0	11	270	Sol brun mésotrophe	6,0	AL	18	30
S14	26	80	0	22	660	Sol brun mésotrophe	5,2	AL	10	51
S15	60	80	0	12	1503	Sol brun lessivé	5,1	Al	10	109
S18	23	80	5	23	564	Sol brun à pellicule calcaire	6,6	La	24	45
S19	15	20	10	4	371	Sol brun eutrophe	6,8	AL	25	33
S20	13	65	0	5	325	Sol brun eutrophe	6,0	AL	20	33
S22	13	80	5	8	331	Sol brun eutrophe humifère	7,1	La	41	31
S23	15	80	5	10	374	Sol brun mésotrophe	6,7	Al	21	12
S24	32	80	5	27	799	Sol brun eutrophe	5,4	La	14	61
S25	80	80	50	1	1993	Sol brun lessivé à pseudogley	4,5	L	3	117
S26	15	80	5	16	373	Sol brun eutrophe humifère	6,6	La	45	16
S29	36	80	10	17	894	Sol brun mésotrophe	5,5	La	13	54
S32	17	45	5	9	424	Sol brun mésotrophe	5,9	Al	13	45
S34	13	60	0	7	326	Sol brun eutrophe	5,9	Al	10	30
S98	18	50	5	8	415	Sol brun à pellicule calcaire	6,0	AL	22	53
S99	9	25	0	5	225	Sol brun à pellicule calcaire	7,1	La	26	27

La profondeur moyenne par station varie de 10 à 80 cm (*Tableau 4.3*). Les stations (2500 m²) montrent un volume minimal de 225 m³ (station 99) et un maximum de 1993 m³ (station 25). L'amplitude des profondeurs est élevée pour chaque station, elles varient de quelques centimètres (roche affleurante) à plusieurs dizaines de centimètres.

Les valeurs moyennes de pH, sur les 60 premiers centimètres, varient de 4,5 (station 25) à 7,1 (stations 13 et 99) (*Tableau 4.2*). Les sols des stations 5/6/11 présentent également un pH inférieur à 5. Les valeurs moyennes de pH, mettent en évidence l'hétérogénéité des sols du massif du Jura.

Les textures moyennes des profils sont équilibrées argilo-limoneuses (*Tableau 4.3*). Cependant, le sol de la station 25 présente une texture dominée par les limons. Les sols des stations 3/7/15/23/32/34 présentent des textures avec une forte proportion d'argiles.

Le taux de matière organique est très important pour le sol de la station 6 qui présente un sol litho-calciue. La plus grosse amplitude du taux de matière organique (MO) entre deux stations d'un même contexte est relevée dans les stations S25 et S26 (*Tableau 4.3*).

Le sol de la station S25 présente la meilleure réserve utile (RU) : il s'agit de la combinaison de la texture, du volume de la pierrosité et de la profondeur du sol. Les stations 11, 15 et 25 présentent les meilleures réserves utiles, supérieures à 100 mm pour l'ensemble de la station. Les stations 6, 23 et 26 présentent une valeur de RU plus faible (inférieure à 20 mm).

Les sols décrits sont brunifiés : il s'agit de cambisols et de luvisols, sauf pour la station 6 qui est lithocalciue (leptosol lithique). Les stations 10 et 25 présentent des traces d'hydromorphie (horizon gleyique). Le profil de la station 10 présente des taches d'oxydation à partir de 20 cm de profondeur. Le sol de la station 25 présente des taches d'oxydation et de réduction dès les premiers centimètres, mais en proportion faible. Les sols des stations 11 et 3 sont lessivés : luvisols hapliques. Le sol de la station 4 est humifère : il s'agit d'un cambisol eutrique humique.

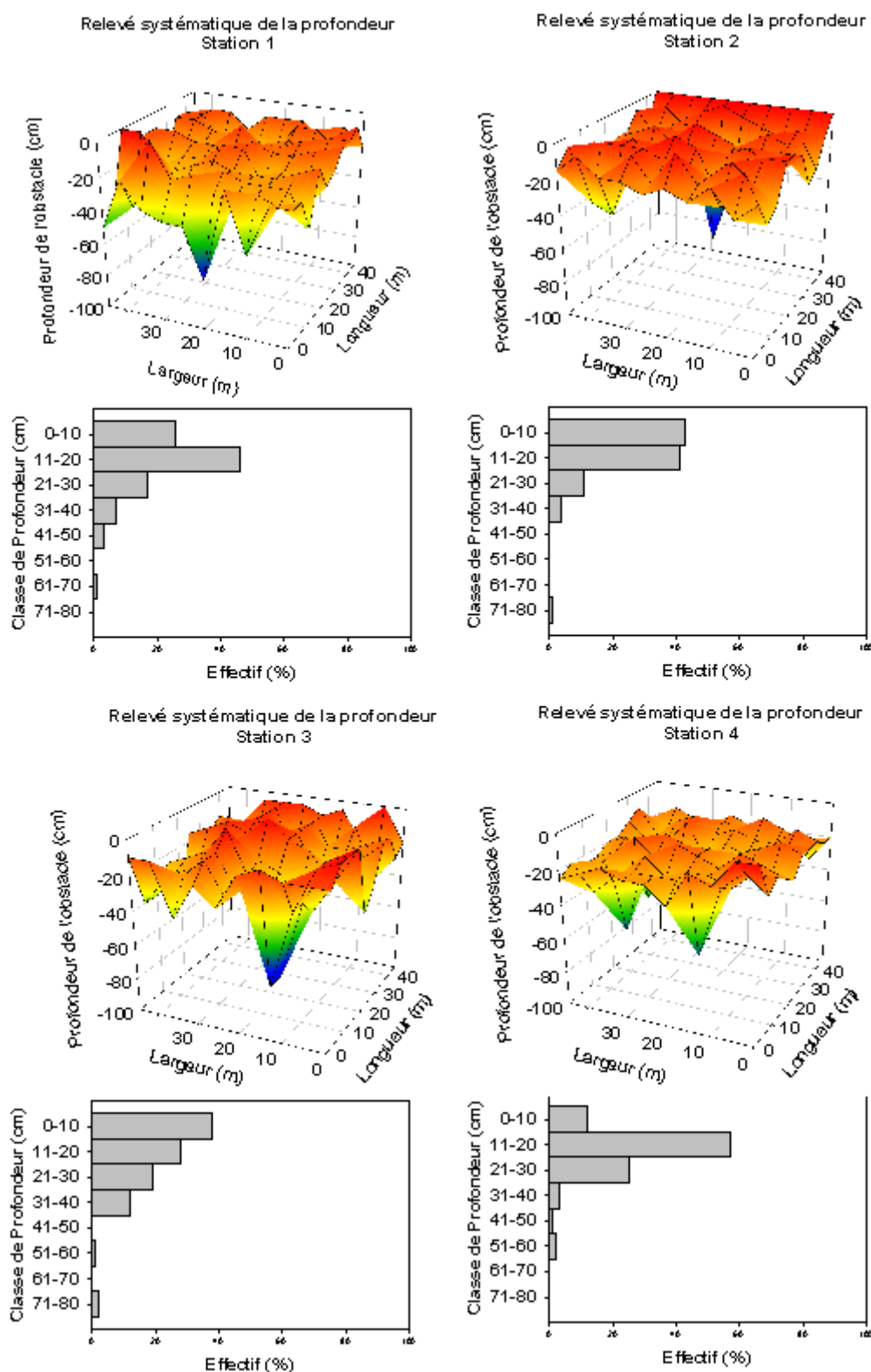


Figure 4.8a. Cartographie et histogrammes des classes de profondeur des stations d'étude (stations 1/2/3/4).

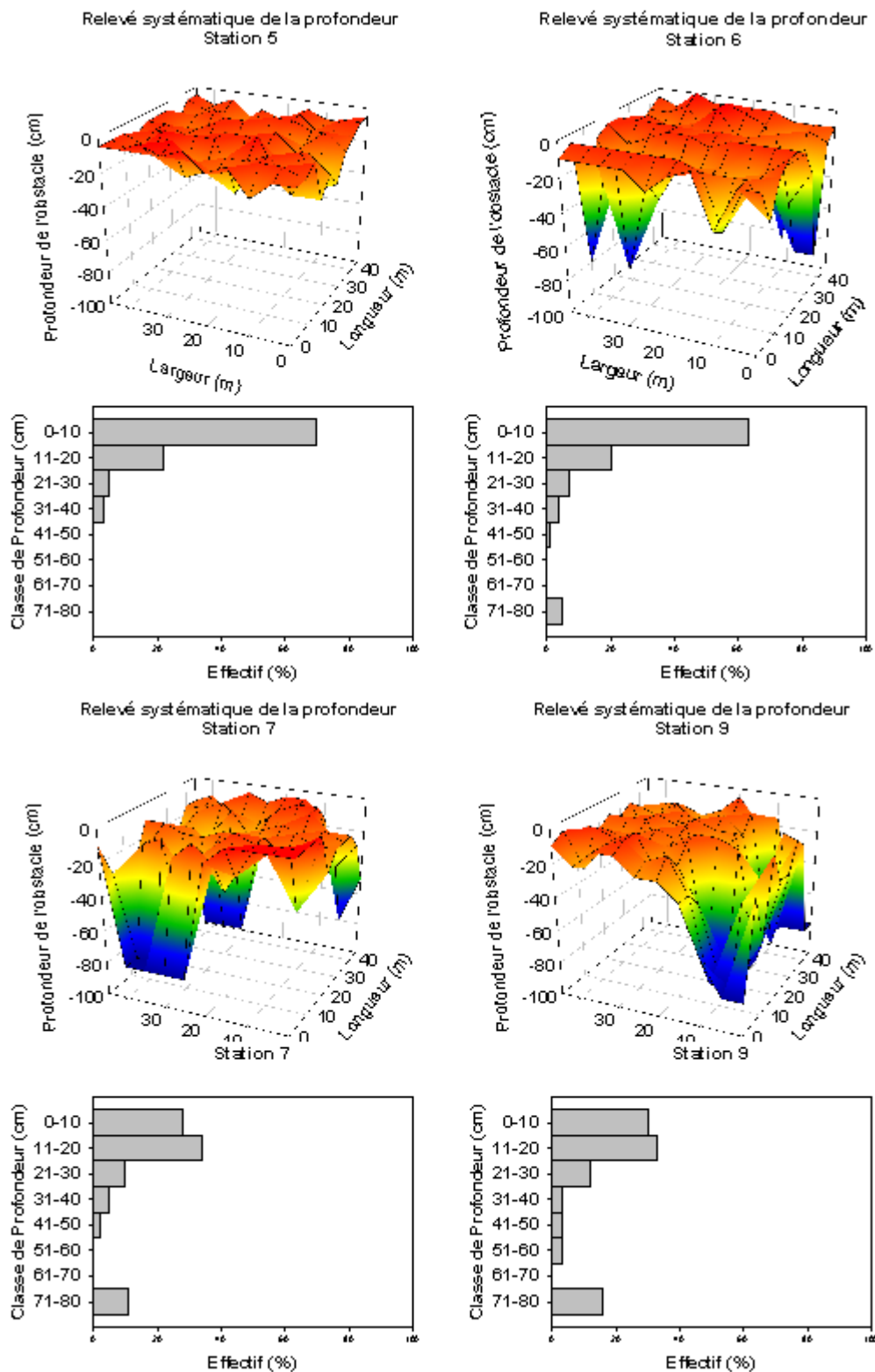


Figure 4.8b. Cartographie et histogrammes des classes de profondeur des stations d'étude (stations 5/6/7/9).

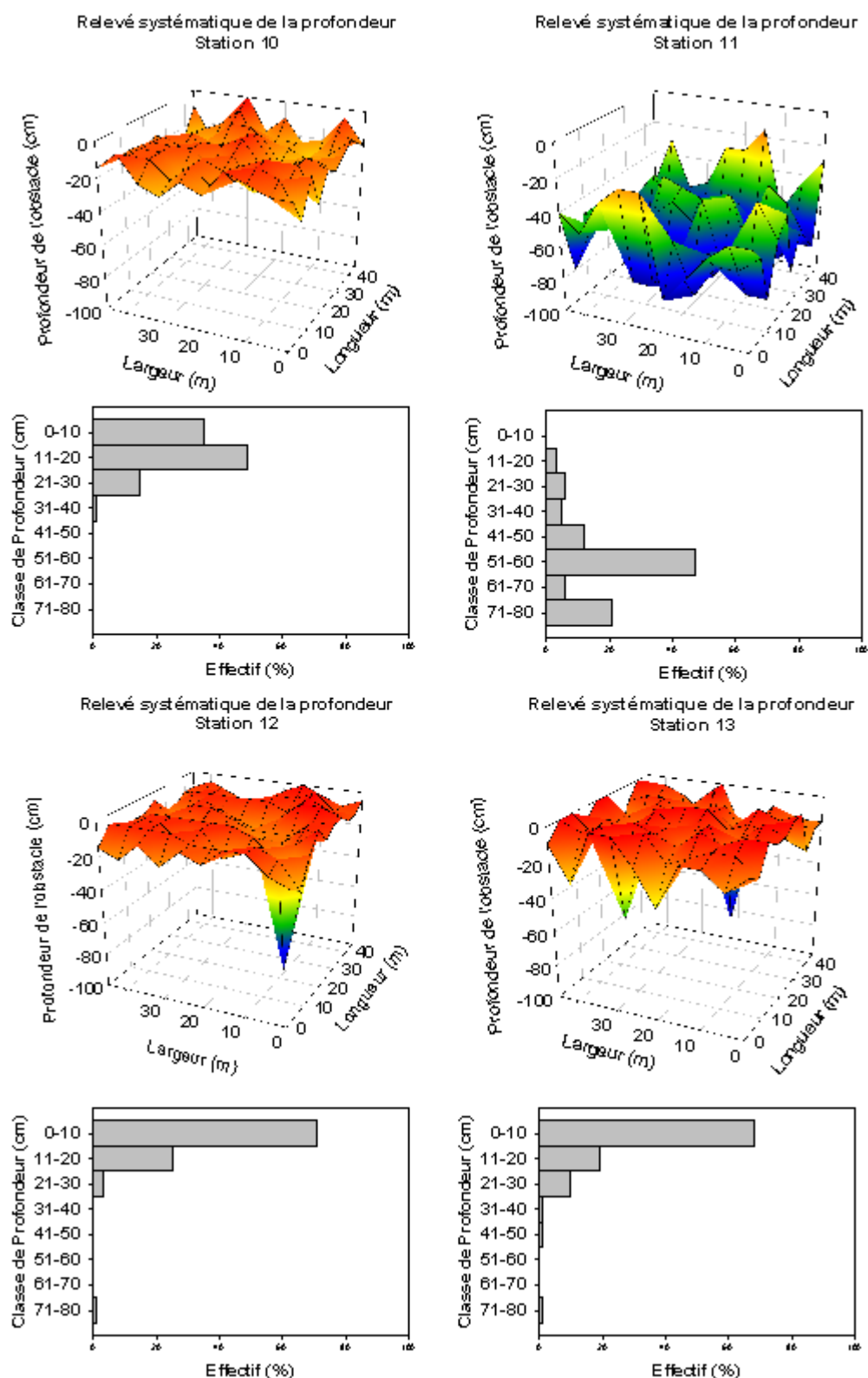


Figure 4.8c. Cartographie et histogrammes des classes de profondeur des stations d'étude (stations 10/11/12/13).

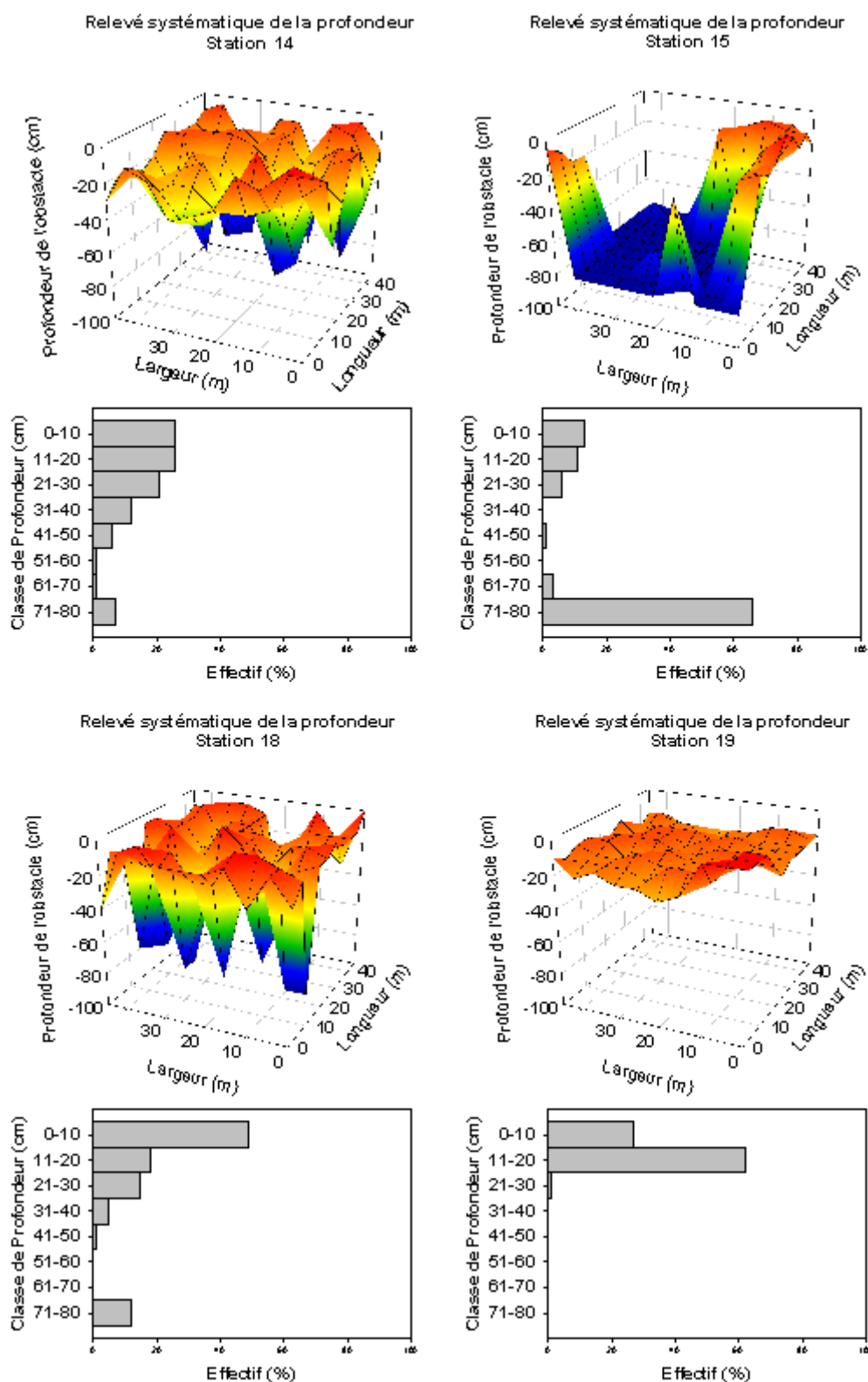


Figure 4.8d. Cartographie et histogrammes des classes de profondeur des stations d'étude (stations 14/15/18/19).

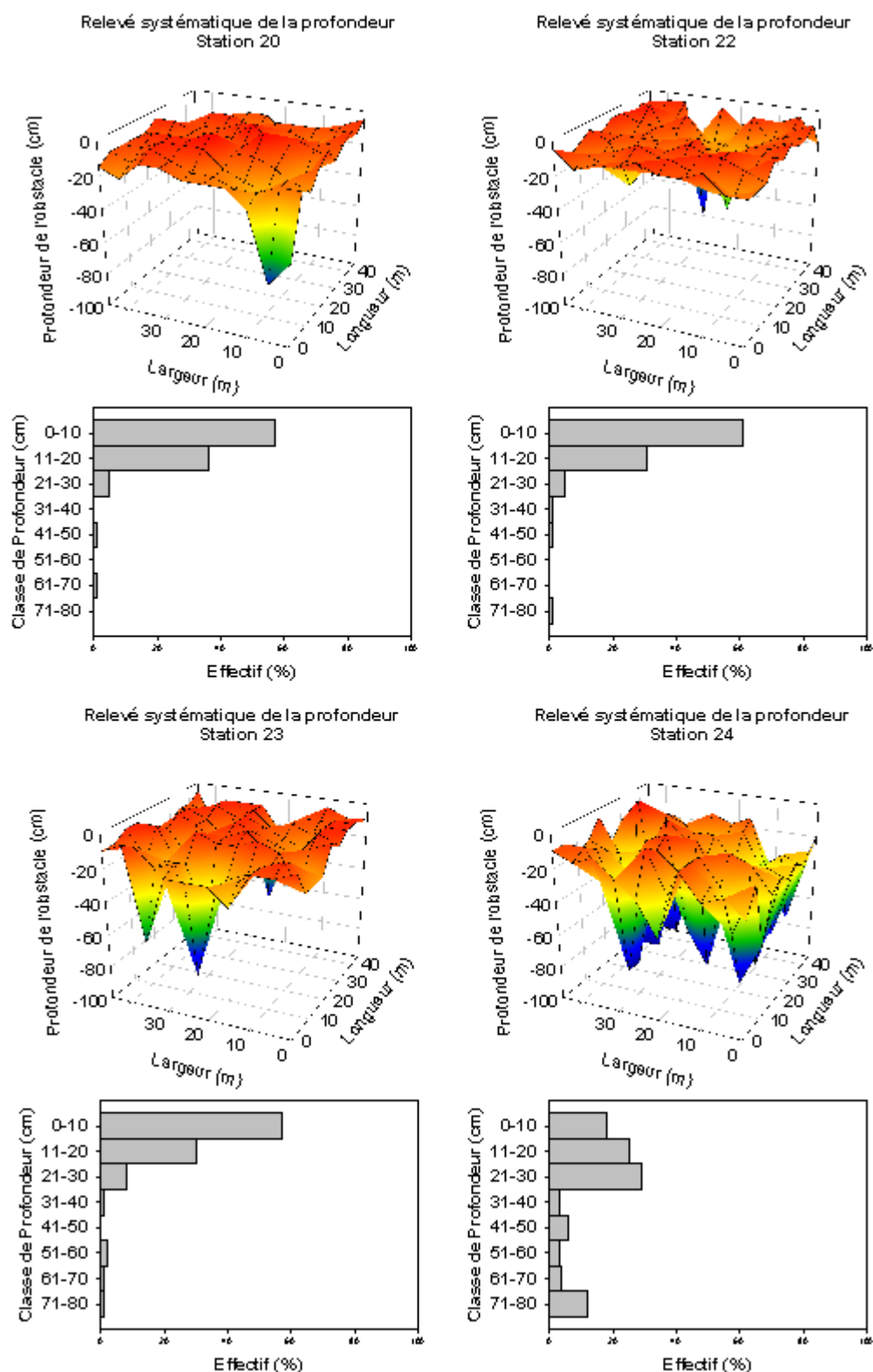


Figure 4.8e. Cartographie et histogrammes des classes de profondeur des stations d'étude (stations 20/22/23/24).

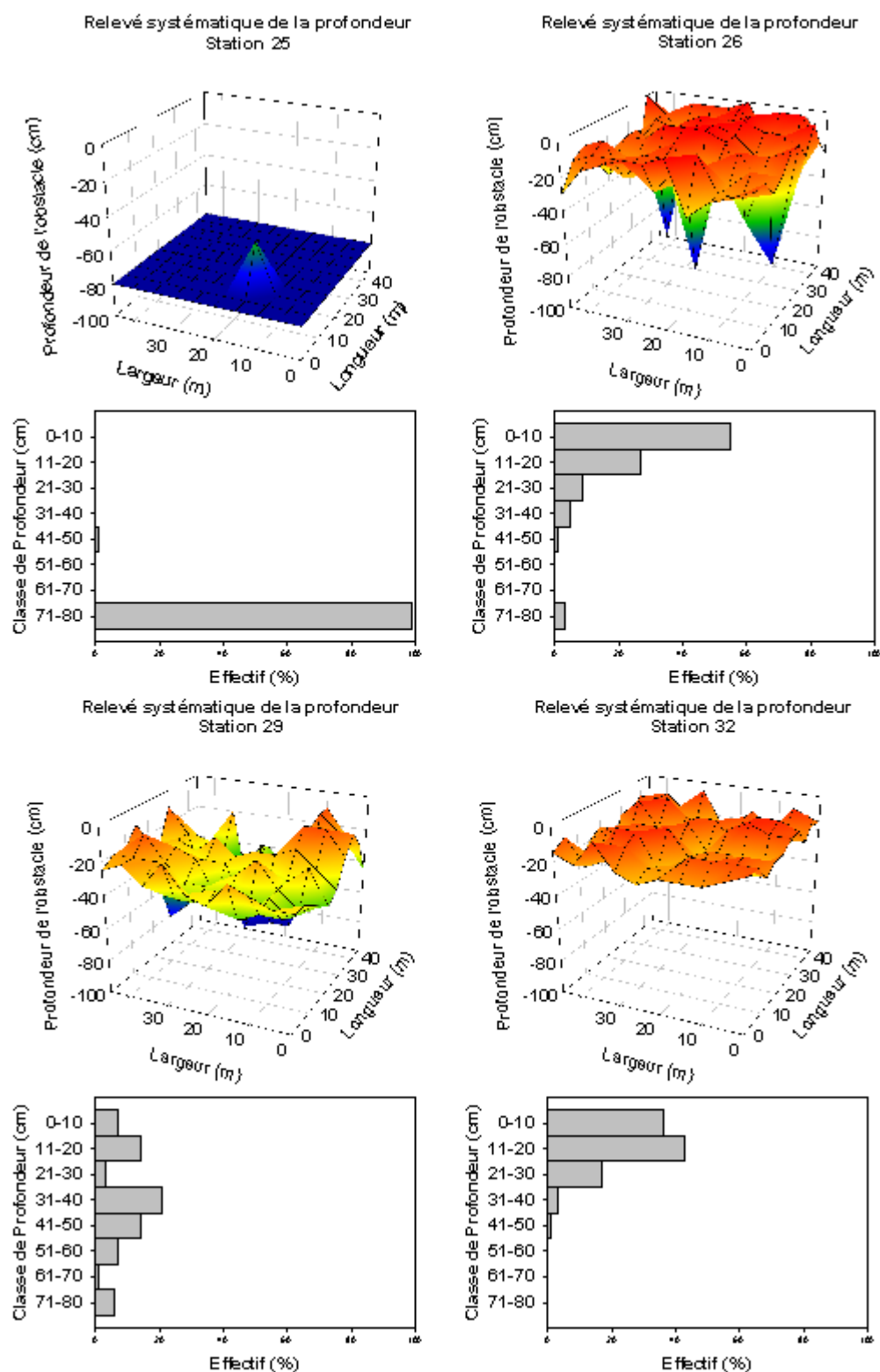


Figure 4.8f. Cartographie et histogrammes des classes de profondeur des stations d'étude (stations 25/26/29/32).

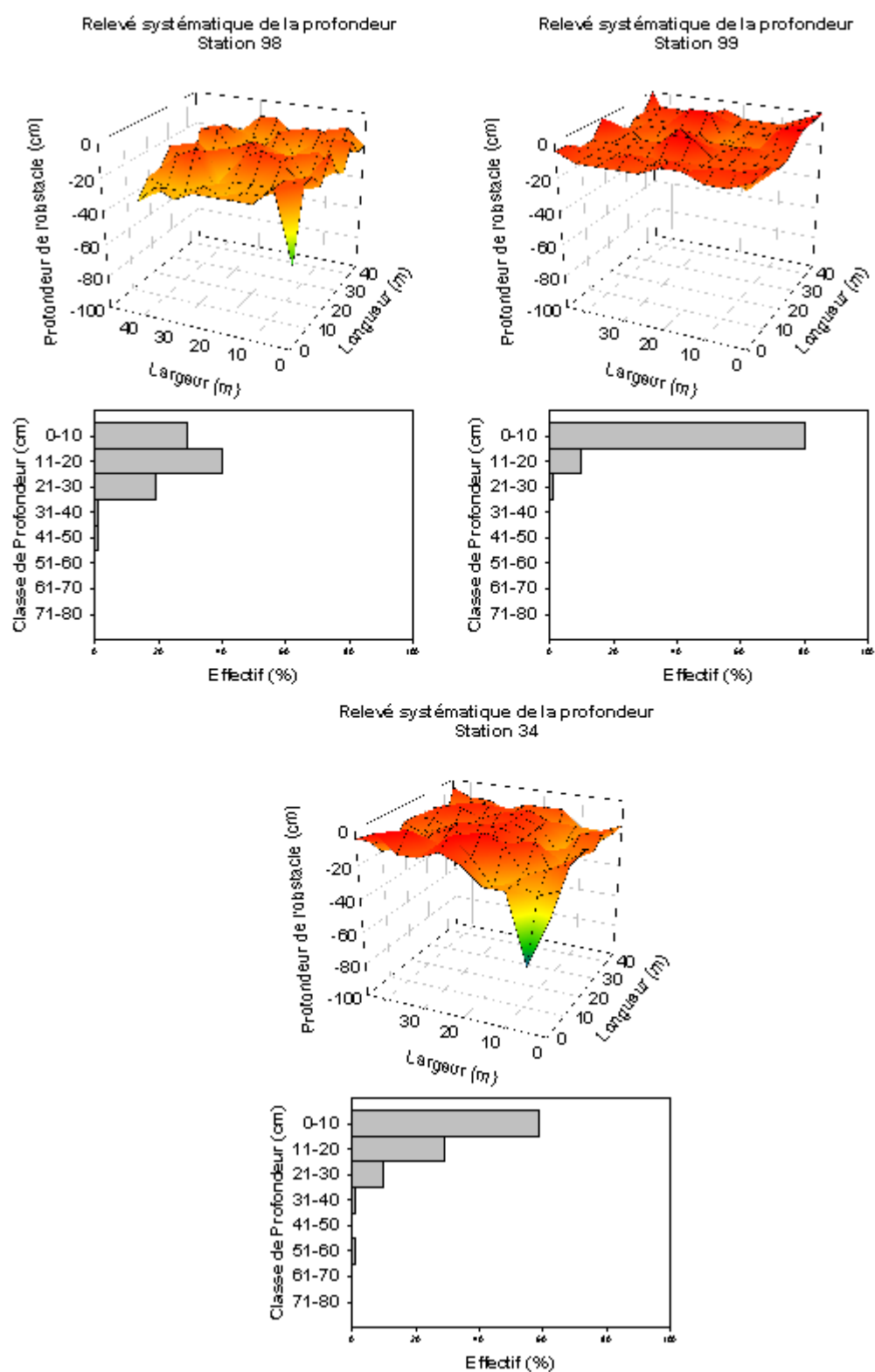


Figure 4.8g. Cartographie et histogrammes des classes de profondeur des stations d'étude (stations 34/98/99).

Les stations peuvent être regroupées selon la profondeur moyenne et l'hétérogénéité du sol.

Trois groupes de profondeurs ont été retenus : stations superficielles (*Figures 4.8a, 4.8b, 4.8c, 4.8d, 4.8e, 4.8f et 4.8g* ; stations 5/6/12/13/19/20/22/23/99), stations à profondeur modérée (*Figures 4.8a, 4.8b, 4.8c, 4.8d, 4.8e, 4.8f et 4.8g* ; stations 1/2/3/4/7/9/10/14/18/24/26/29/32/34/98) et les stations profondes (*Figures 4.8a, 4.8b, 4.8c, 4.8d, 4.8e, 4.8f et 4.8g* ; stations 11/15/25). La variabilité des stations sélectionnées est fortement influencée par la nature de la roche sous-jacente. Les bancs de calcaire dur présentent des sols plus superficiels alors que les calcaires marneux ou les marnes entraînent des sols plus profonds. Une station caractérisée par une accumulation de limons (*Figures 4.8a, 4.8b, 4.8c, 4.8d, 4.8e, 4.8f et 4.8g* ; station 25) qui présente le sol le plus profond a été choisie en raison de ses propriétés originales. Les stations superficielles sont conditionnées par la présence d'un banc de calcaire ou l'abondance d'éléments grossiers qui limitent le volume de sol (*Figures 4.9a, 4.9b, 4.9c et 4.9d*). Les stations dites « moyennes » présentent des classes de profondeurs multiples conséquence d'une variabilité importante de la roche sous-jacente. La profondeur de l'obstacle varie à une échelle très locale (mètre par mètre). Les arbres qui se développent sur les stations profondes sont peu contraints par les obstacles. Le volume de sol est important sur l'ensemble de la station.

Les stations se différencient en stations hétérogènes (*Figures 4.8a, 4.8b, 4.8c, 4.8d, 4.8e, 4.8f et 4.8g* ; stations 1/2/3/4/6/7/9/11/12/13/14/15/18/20/22/23/24/26/29/32/34/98) et en stations homogènes (*Figures 4.8a, 4.8b, 4.8c, 4.8d, 4.8e, 4.8f et 4.8g* ; stations 5/10/19/25/99). La station 25 présente à la fois la plus grande homogénéité de profondeur ainsi que les valeurs les plus fortes. La station 11 présente une hétérogénéité plus forte avec une profondeur moyenne qui reste importante. L'abondance des classes de profondeur supérieures à 50 cm est élevée mais les classes les plus superficielles sont tout de même représentées. L'indice d'hétérogénéité est plus élevé que celui de la station 25. Les stations 3 et 14 peuvent être regroupées pour la présence de nombreuses classes de profondeur comprises entre 0 et 40 cm. Leur profondeur moyenne est proche (autour de 25 cm). Le groupe 2/4/10 est proche du précédent, avec toutefois, des classes plus superficielles, comprises principalement de 0 à 20 cm. Pour cet ensemble de stations, la profondeur moyenne est comprise entre 15 et 20 cm. L'ensemble 6/13/26 regroupe les stations superficielles avec une dominance de la classe de profondeur 0 à 10 cm, avec une profondeur moyenne inférieure à 15 cm. Les classes les plus profondes étant représentées, l'indice d'hétérogénéité est du même ordre que celui des stations 3 et 2 (entre 11 et 16). Le mode de répartition de la profondeur diffère selon les stations mais les stations les plus superficielles présentent par endroit des « pics » de profondeur importante, directement liés à la roche sous-jacente. Ces changements de profondeurs sont alors brutaux (exemple : stations sur Lapiaz, 26 et 6). A l'opposé, les stations 11 et 14 présentent des variations régulières sur toute leur surface. Cette configuration influence directement la réserve utile du sol de la station. Les cartes montrent que la variabilité de la réserve utile peut être importante, directement liée à l'hétérogénéité de profondeur du sol sur la station.



Figure 4.9a. Photographies des profils décrits sur les stations d'étude (stations 1/2/3/5/7/10/11/13).



Figure 4.9b. Photographies des profils décrits sur les stations d'étude (stations 14/15/18/23/25/29/34).



Figure 4.9c. Photographies des profils décrits sur les stations d'étude (stations 4/6/9/12/19/20).



Figure 4.9d. Photographies des profils décrits sur les stations d'étude (stations 22/24/26/32/98/99).

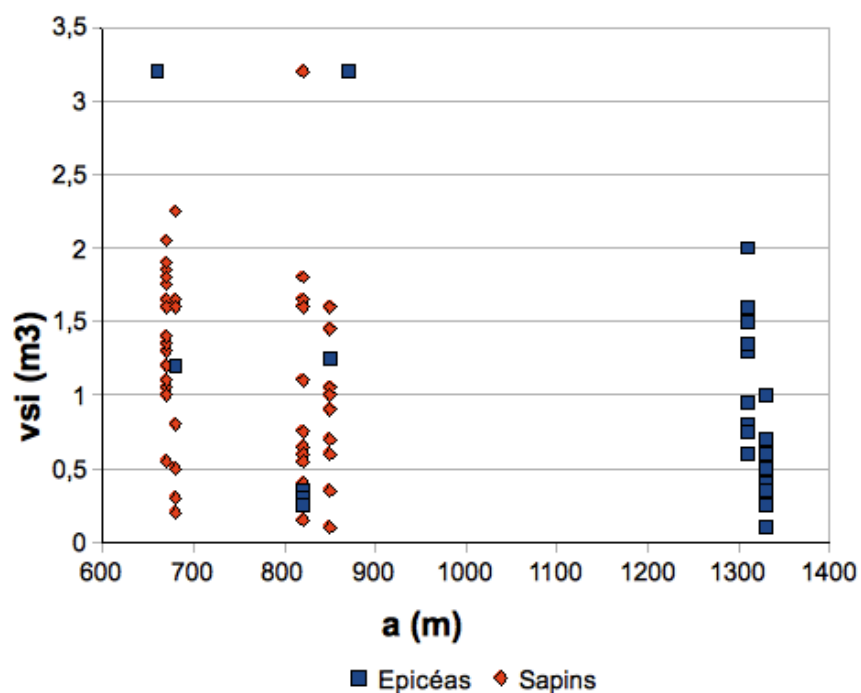


Figure 4.10. Volume de sol disponible par arbre (vsi) en fonction de l'altitude de la station ; sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu). La mesure de volume est faite aux 4 points cardinaux, à 1,50 m de l'arbre.

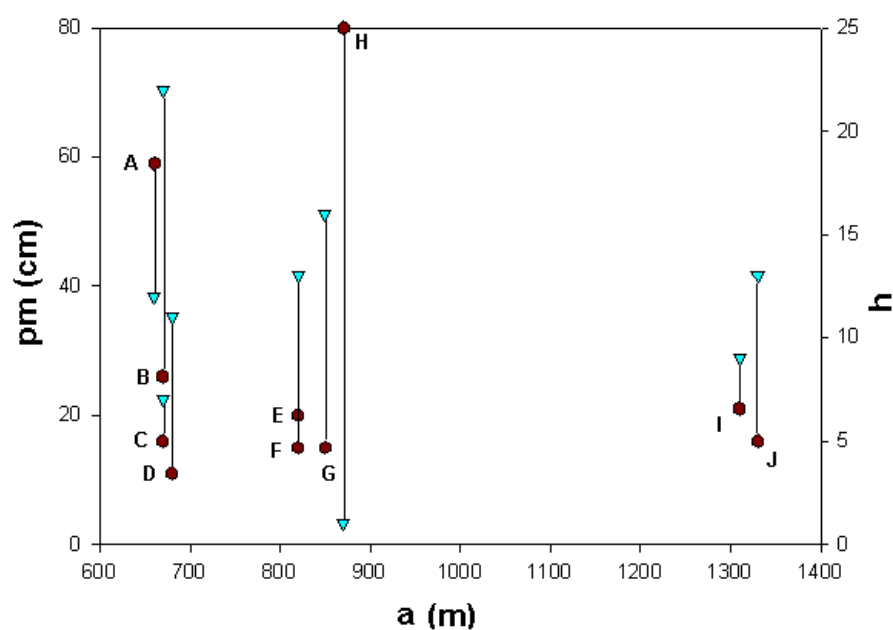


Figure 4.11. Profondeur moyenne de la station (pm (rond rouge)) et indice d'hétérogénéité (h (triangle bleu)) en fonction de l'altitude de la station (sapins et épicéas). La valeur de profondeur correspond à la moyenne des profondeurs issues de l'échantillonnage systématique.

Les figures 4.10 et 4.11 montrent que l'amplitude des mesures du volume du sol prospectable, à l'échelle stationnelle ou individuelle, tend à diminuer suivant un gradient altitudinal croissant. Le volume est compris entre 0 et 3,2 m³.

Avec les échelles choisies, les indices d'hétérogénéité des stations les plus profondes (11 et 25) sont en position inférieure par rapport à la profondeur moyenne de la station. L'amplitude de répartition des indices d'hétérogénéité le long du gradient altitudinal tend à diminuer, comme le volume de sol.

4.2. Dendrométrie et vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.

Tableau 4.4. Mesures dendrométriques des arbres échantillonnés par station. s : station ; dm (27 stat.) : diamètre moyen (1ère session de mesures) ; dm (10 stat.) : diamètre moyen (2ème session de mesures) ; hm (10 stat.) : hauteur moyenne (2ème session de mesures) ; vtm (27 stat.) : vitesse transversale moyenne (1ère session de mesures) ; vlm (27 stat.) : vitesse longitudinale moyenne (1ère session de mesures) ; vtm (10 stat.) : vitesse transversale moyenne (2ème session de mesures) ; vlm (10 stat.) : vitesse longitudinale moyenne (2ème session de mesures).

s	dm (27 stat.) (cm)	dm (10 stat.) (cm)	hm (10 stat.) (m)	vtm (27 stat.) (m.s-1)	vlm (27 stat.) (m.s-1)	vtm (10 stat.) (m.s-1)	vlm (10 stat.) (m.s-1)
S1	45 ± 15	-	-	2206 ± 297	3464 ± 339	-	-
S2	50 ± 16	51 ± 16,5	27 ± 6,7	2009 ± 357	3713 ± 686	2581 ± 548	3305 ± 1119
S3	46 ± 11	48 ± 11,5	28 ± 2,5	2210 ± 184	3249 ± 493	2809 ± 408	3139 ± 744
S4	41 ± 10	42 ± 10,1	25 ± 5,2	2255 ± 300	4101 ± 367	3056 ± 525	4320 ± 371
S5	43 ± 11	-	-	2081 ± 306	3603 ± 481	-	-
S6	47 ± 8	48 ± 8,3	33 ± 3	1829 ± 363	4022 ± 566	2397 ± 423	4318 ± 347
S7	45 ± 14	-	-	1983 ± 421	3542 ± 631	-	-
S9	46 ± 20	-	-	2236 ± 534	3574 ± 628	-	-
S10	38 ± 10	39 ± 11	26 ± 3,5	2253 ± 318	3332 ± 570	3019 ± 251	3571 ± 484
S11	58 ± 8	58 ± 7,5	31 ± 1,8	1825 ± 251	2880 ± 686	1825 ± 609	2880 ± 686
S12	49 ± 12	-	-	2067 ± 206	3879 ± 695	-	-
S13	44 ± 14	42 ± 12,8	24 ± 5	2236 ± 343	3153 ± 763	3056 ± 609	3551 ± 740
S14	38 ± 8	40 ± 7,5	26 ± 1,2	2214 ± 233	3225 ± 512	2900 ± 365	3262 ± 692
S15	57 ± 23	-	-	1797 ± 473	3777 ± 420	-	-
S18	60 ± 11	-	-	1927 ± 303	3313 ± 594	-	-
S19	27 ± 6	-	-	2584 ± 397	3573 ± 568	-	-
S20	46 ± 12	-	-	1867 ± 342	3690 ± 641	-	-
S22	61 ± 24	-	-	1580 ± 368	3619 ± 245	-	-
S23	35 ± 6	-	-	2284 ± 185	3169 ± 525	-	-
S24	33 ± 9	-	-	2524 ± 633	2892 ± 1191	-	-
S25	55 ± 23	55 ± 23,4	30 ± 7,5	1929 ± 454	3253 ± 378	1929 ± 454	3253 ± 378
S26	50 ± 17	46 ± 16,7	30 ± 7,2	1948 ± 328	3822 ± 673	2846 ± 725	3672 ± 923
S29	75 ± 15	-	-	1437 ± 321	3721 ± 691	-	-
S32	48 ± 9	-	-	2105 ± 239	3158 ± 637	-	-
S34	38 ± 10	-	-	2229 ± 198	3460 ± 67	-	-
S98	50 ± 10	-	-	1902 ± 264	2661 ± 1087	-	-
S99	39 ± 13	-	-	2079 ± 617	2056 ± 324	-	-

Les diamètres moyens s'échelonnent de 27 cm pour la station 19 à 75 cm pour la station 29 (Tableau 4.4). Sur les stations 25, 26 ou 29, les arbres sont plus clairsemés et mis à part la régénération (tiges inférieures à 15 centimètres) les arbres sont de diamètre plus importants. A part les stations 7, 22 et 29, les diamètres moyens sont inférieurs à 60 cm.

Les hauteurs ont été mesurées lors de la 2ème session de mesures. Les stations 11 et 6 se différencient par leur hauteur moyenne supérieure à 30 mètres (Tableau 4.4). Les stations S13 et S4, présentent une hauteur moyenne inférieure à 25 mètres.

Les stations 11 et 25 s'individualisent par une valeur de vitesse transversale plus faible, pour la 2ème session de mesures (*Tableau 4*). Lors de la première session de mesures, de nombreuses stations (10) ont des valeurs inférieures à 2000 m.s^{-1} . Les stations 22 et 29 présentent des valeurs transversales qui sont même inférieures ou égales à 1500 m.s^{-1} . Les stations 19 et 24 présentent les valeurs les plus importantes, au-delà de 2500 m.s^{-1} .

Les stations 11, 24, 98 et 99 présentent les valeurs de vitesse longitudinale les plus faible, inférieures à 3000 m.s^{-1} . Les stations 6 et 4 présentent les valeurs longitudinales les plus élevées, supérieures à 4000 m.s^{-1} .

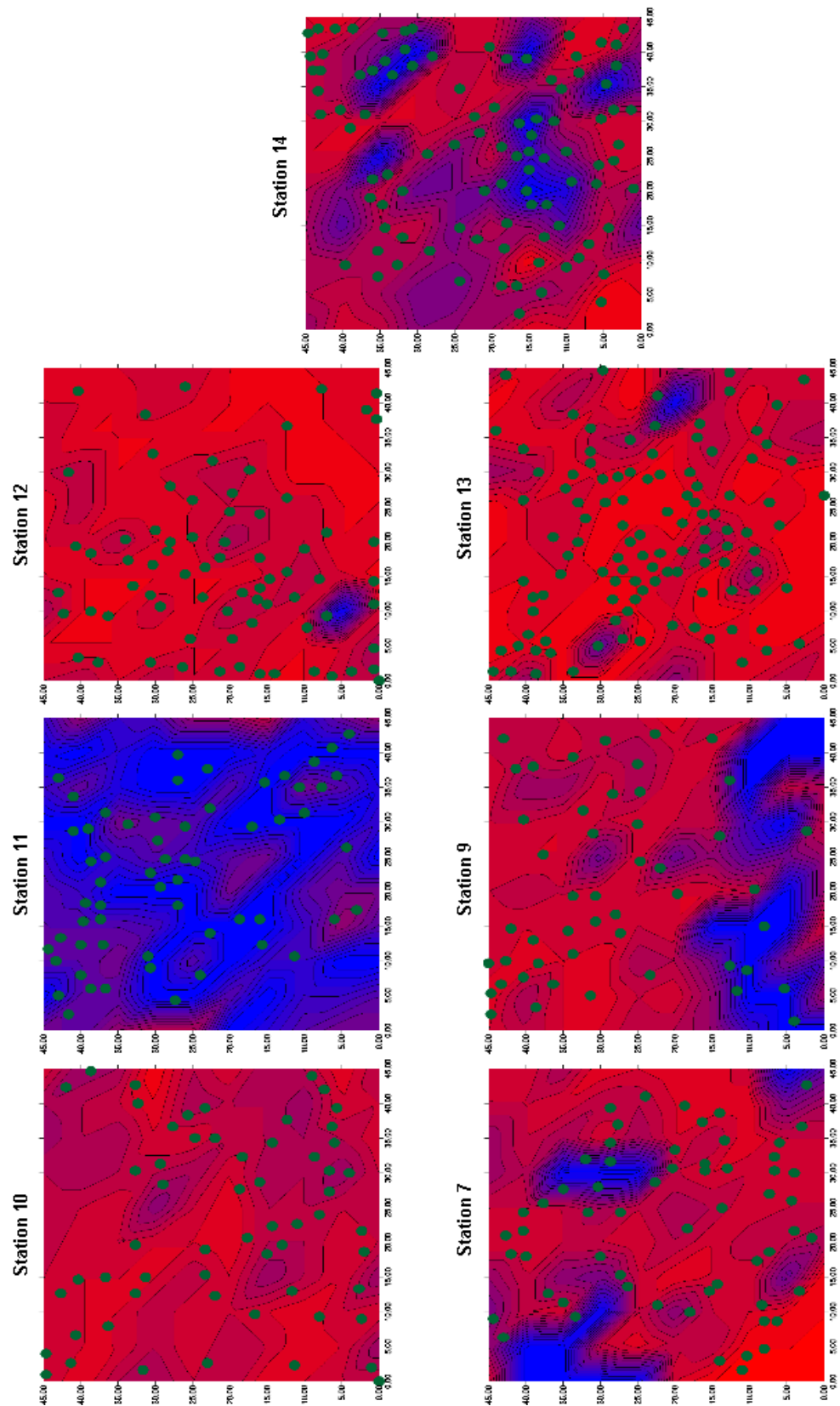


Figure 4.12a. Profondeur du sol et localisation des arbres au sein des stations d'étude (Stations 7/9/10/11/12/13/14).

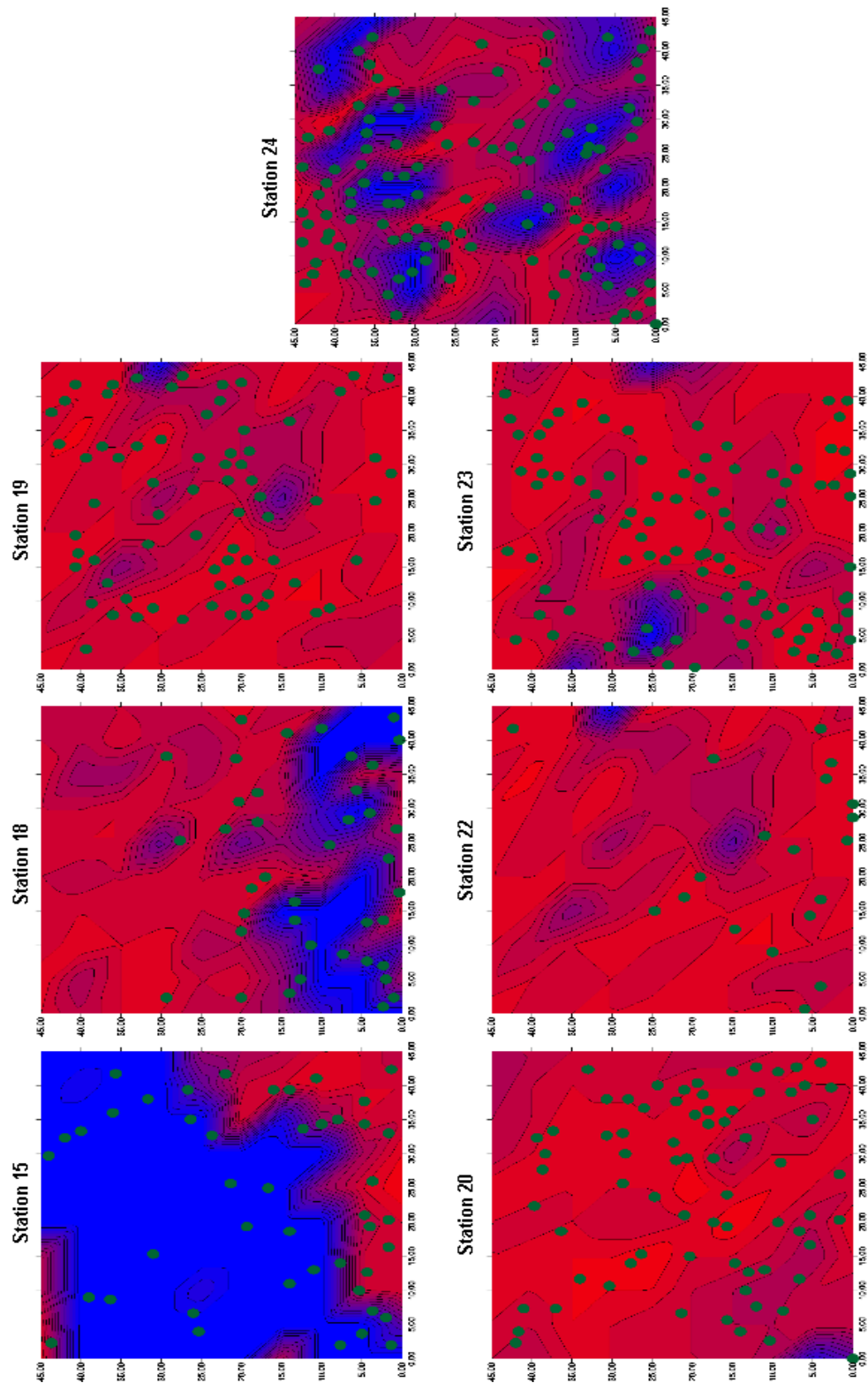


Figure 4.12b. Profondeur du sol et localisation des arbres au sein des stations d'étude (Stations 15/18/19/20/22/23/24).

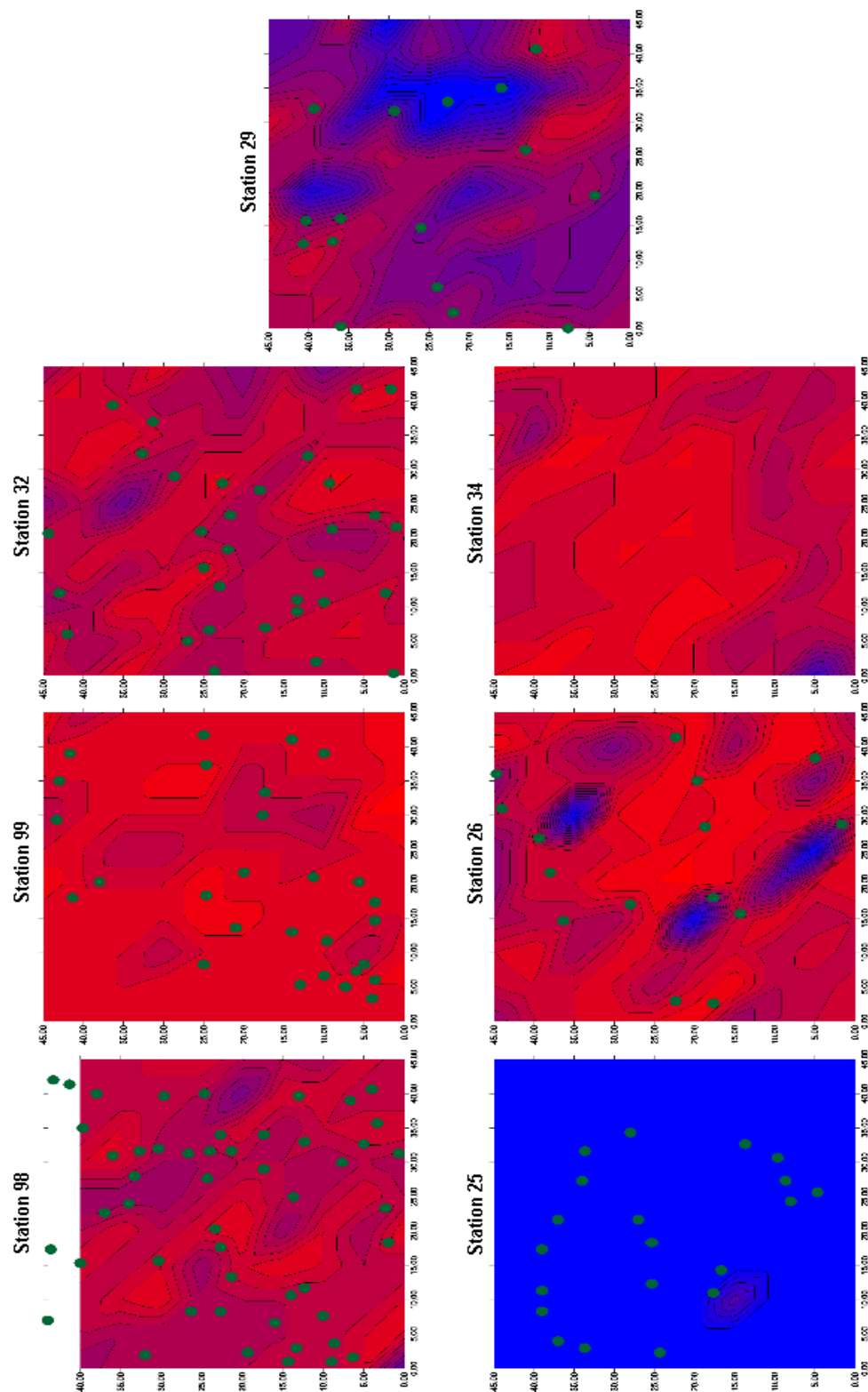


Figure 4.12c. Profondeur du sol et localisation des arbres au sein des stations d'étude (Stations 25/26/29/32/34/98/99).

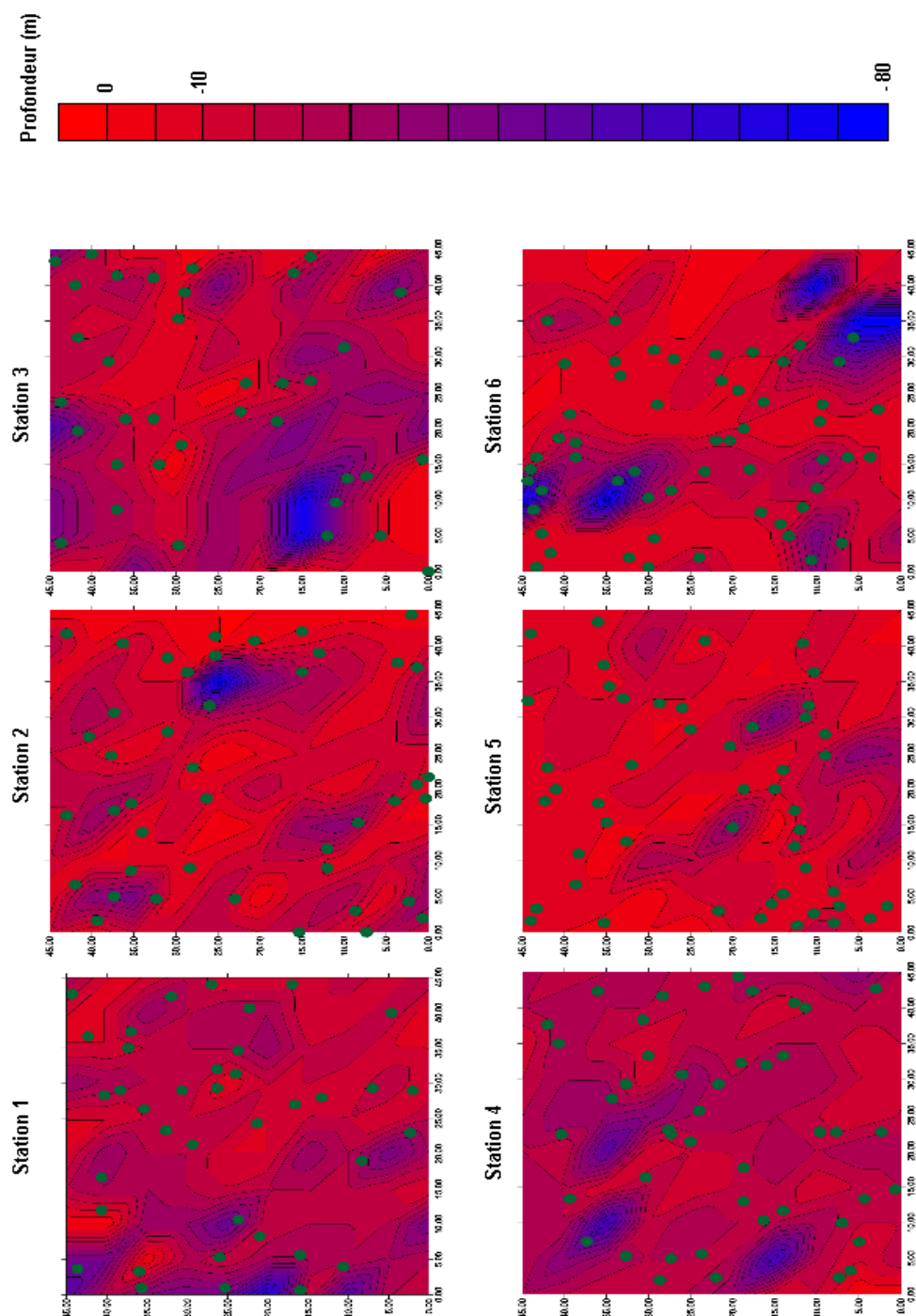


Figure 4.12d. Profondeur du sol et localisation des arbres au sein des stations d'étude (Stations 1/2/3/4/5/6).

Les figures 4.12a, 4.12b, 4.12c et 4.12d montrent que les arbres se répartissent au sein des stations sans que la profondeur du sol exerce une influence sur cette répartition. La densité des arbres est très différente d'une station à une autre. Les figures ne permettent pas de conclure à l'influence de la répartition spatiale de la profondeur du sol sur la localisation précise des arbres. Les analyses suivantes expliquent les variations individuelles en fonction de la profondeur.

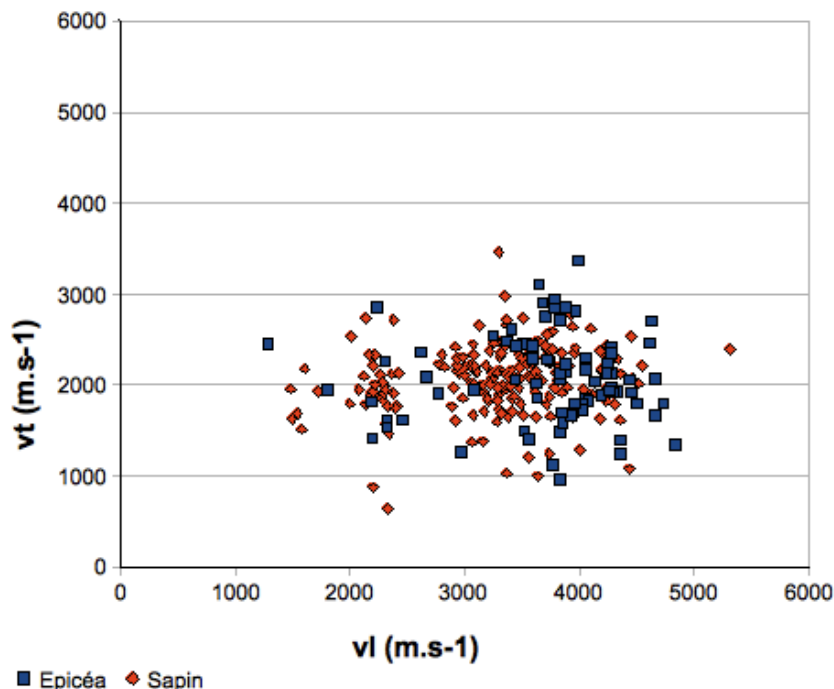
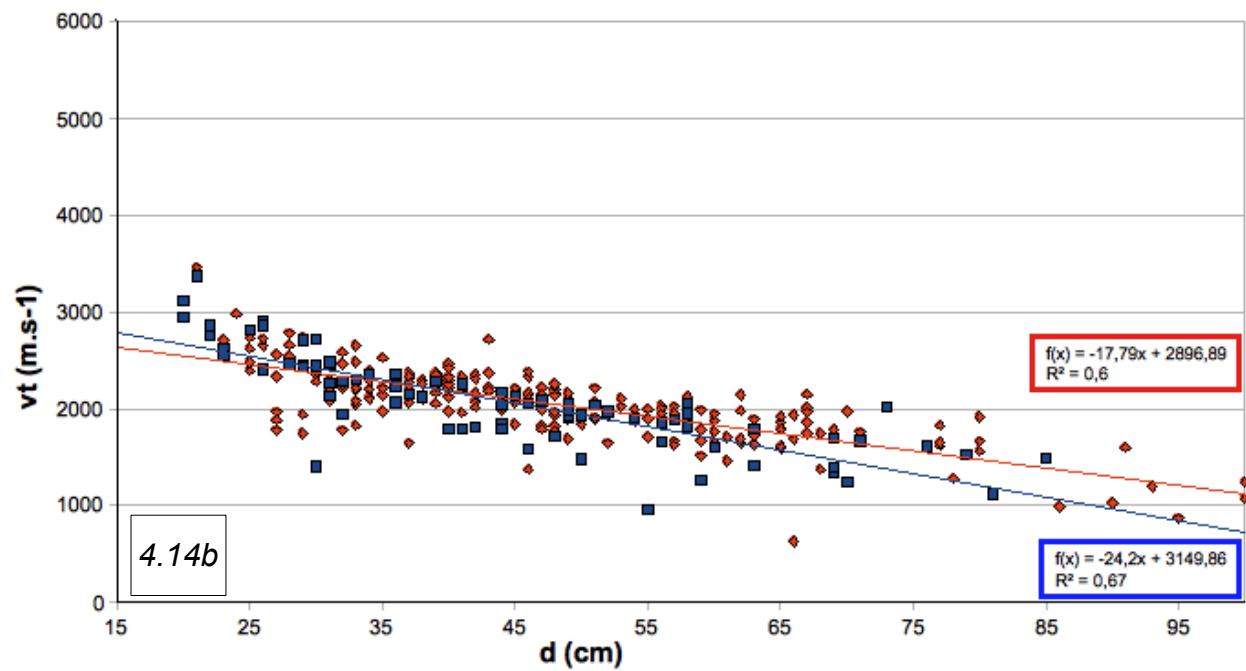
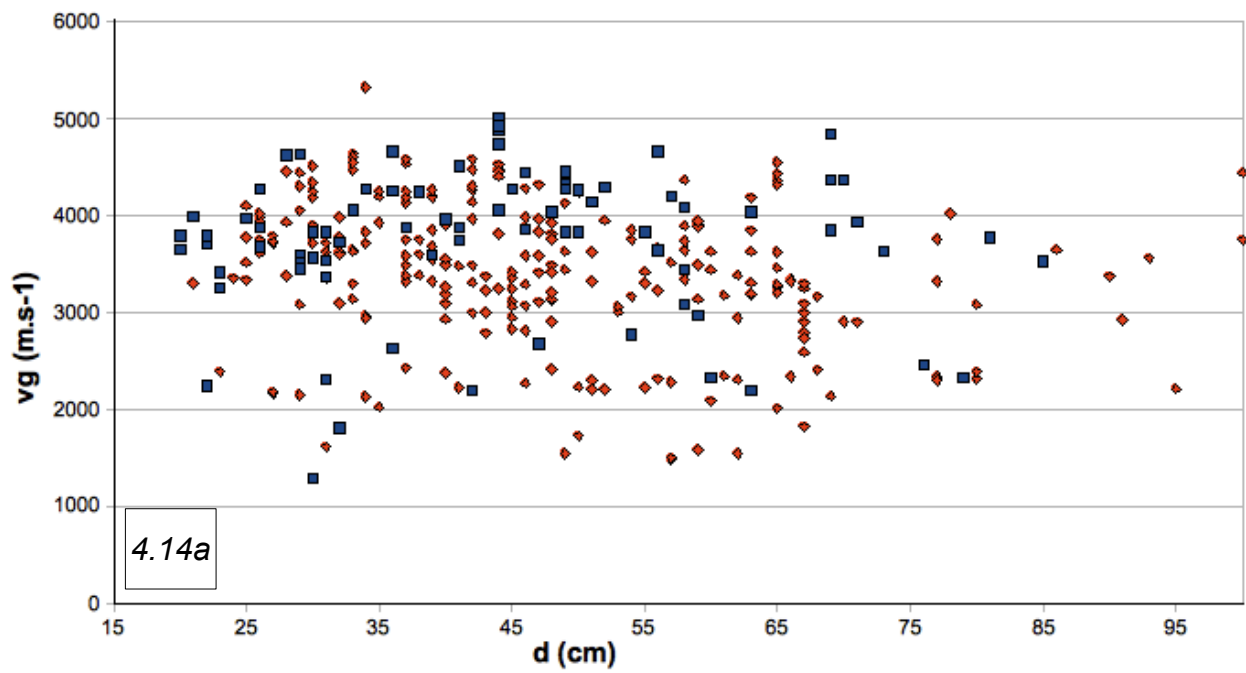


Figure 4.13. Représentation des mesures des vitesses transversales (Vit. Trans.) en fonction des vitesses longitudinales (Vit. Long.) (sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu)).

Il n'existe pas de relation entre les valeurs de vitesses longitudinale et transversale (*Figure 4.13*). Le résultat est le même pour les sapins et les épicéas. Si la variabilité des vitesses transversales est similaire pour les 2 espèces, il n'en est pas de même pour les vitesses longitudinales. Les valeurs longitudinales sont réparties sur les valeurs les plus hautes de vitesses longitudinales.

La figure 4.14b montre qu'il n'existe pas d'effet du diamètre de l'individu sur la mesure de vitesse longitudinale. Cependant, pour un même diamètre, un épicéa présentera une vitesse longitudinale supérieure à celle d'un sapin. La figure 4.14a montre qu'il existe une relation négative du diamètre de l'arbre sur la mesure de vitesse transversale. Le lien entre ces variables est relativement fort ($r^2 > 0,60$). Ce sont les arbres ayant le plus petit diamètre qui présentent une vitesse transversale plus élevée.



Figures 4.14a et 4.14b. Représentation des mesures des vitesses longitudinales (a) (v_l) et transversales (b) (v_t) en fonction du diamètre des arbres (d) (sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu)).

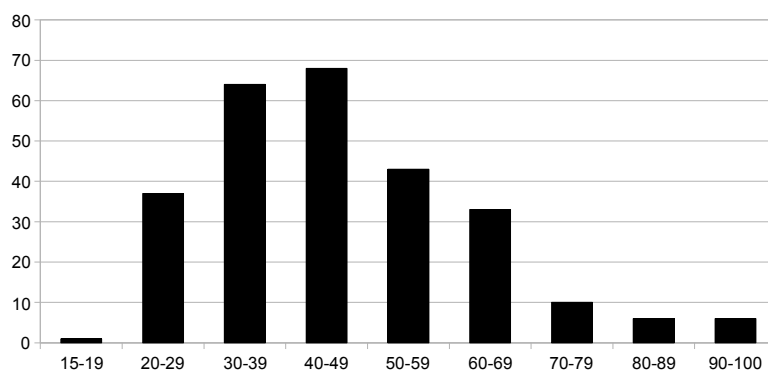


Figure 4.15. Représentation des « classes de diamètre » des arbres échantillonnés pour les mesures au Sylvatest Duo®.

Un test de normalité (Kolmogorov-Smirnov) a été réalisé sur les données au Sylvatest Duo®. Les données suivent la loi normale (Figure 4.15).

Figure 4.16. Tableau des comparaisons 2 à 2 des moyennes des vitesses au Sylvatest Duo® (longitudinales et transversales, cf. Tableau 4.4) par le test de Kruskal Wallis.

Kruskal-Wallis (vitesses longitudinales)													Kruskal-Wallis (vitesses transversales)																
Station	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	18	19	20	22	23	24	25	26	29	32	34	98	99		
1																													
2																													
3																													
4																													
5																													
6																													
7																													
9																													
10																													
11																													
12																													
13																													
14																													
15																													
18																													
19																													
20																													
22																													
23																													
24																													
25																													
26																													
29																													
32																													
34																													
98																													
99																													

La figure 4.16 montre que les relations significatives ne sont pas nombreuses que ce soit pour les vitesses longitudinales ou transversales (cf. Tableau 4.4). La station 99 se différencie pour les vitesses longitudinales et la station 29 se différencie pour les valeurs transversales.

4.3. Croisement des données écologiques et des données sylvicoles.

Aucune relation significative n'a été relevée entre le volume individuel de sol et le diamètre ou la hauteur de l'arbre (*Figures 4.17a et 4.17b*). Il n'existe aucune relation entre le pH (entre 4,7 et 6,8) et le volume jusqu'à 2,5 m³. Pour un volume plus important, la variation du pH se réduit entre 4,5 et 5,5. Les résultats ont montré que les arbres ayant un volume de sol important (supérieur à 3 m³) se situe à droite du nuage de points.

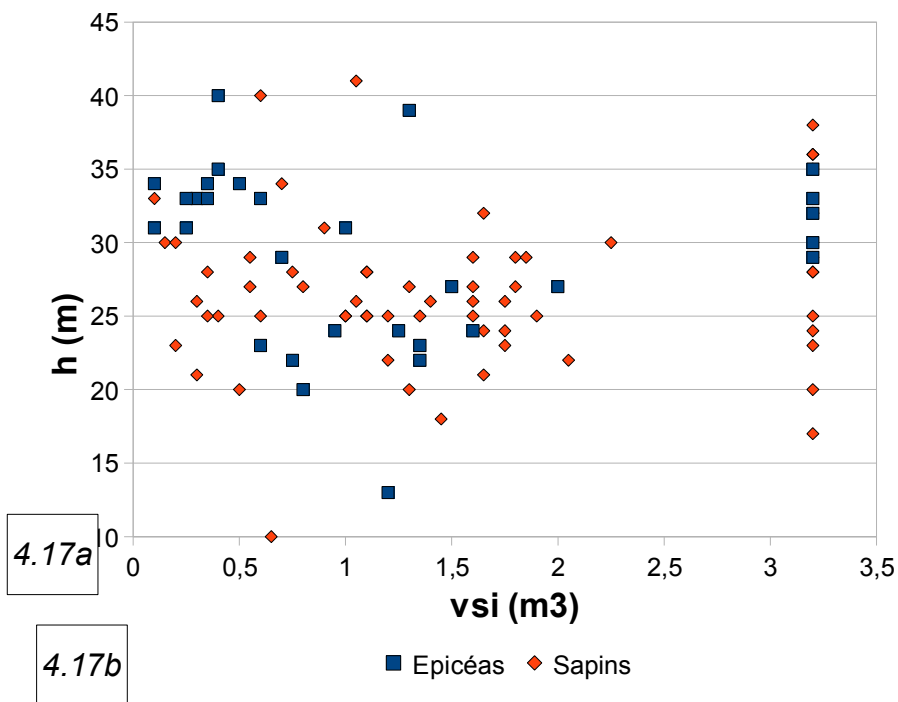
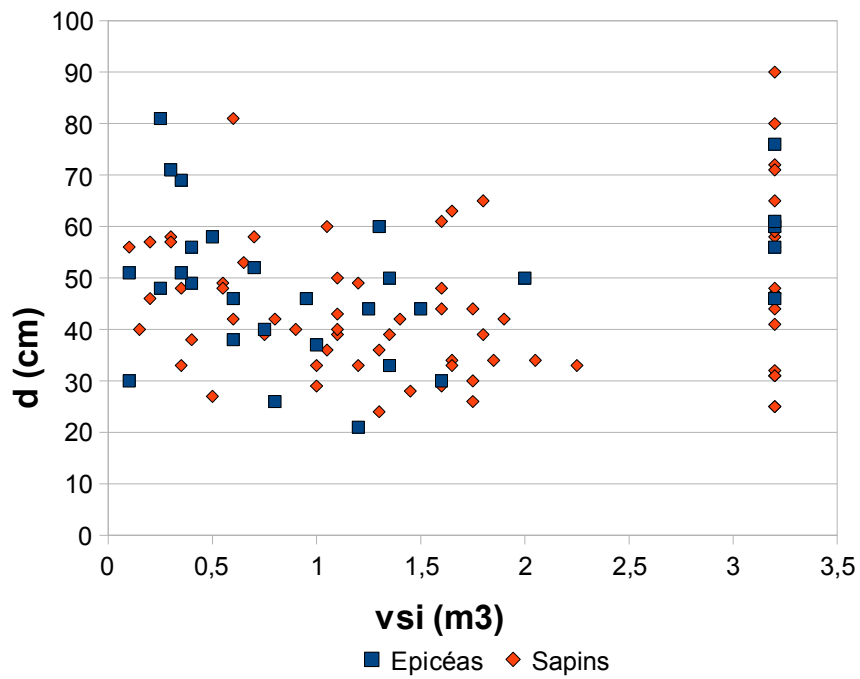
Aucune corrélation n'a été mise en évidence entre le facteur altitude et les vitesses longitudinales et transversales (*Figures 4.18a et 4.18b*). Comme précédemment, une diminution de la variabilité (toutefois légère) a été notée avec l'augmentation de l'altitude.

Les figures 4.19a et 4.19b montrent que la variabilité des vitesses longitudinales et transversales diminue avec l'augmentation du volume du sol stationnel. Cela est plus marqué pour les vitesses longitudinales. Cependant, aucune corrélation positive ou négative n'est mise en évidence.

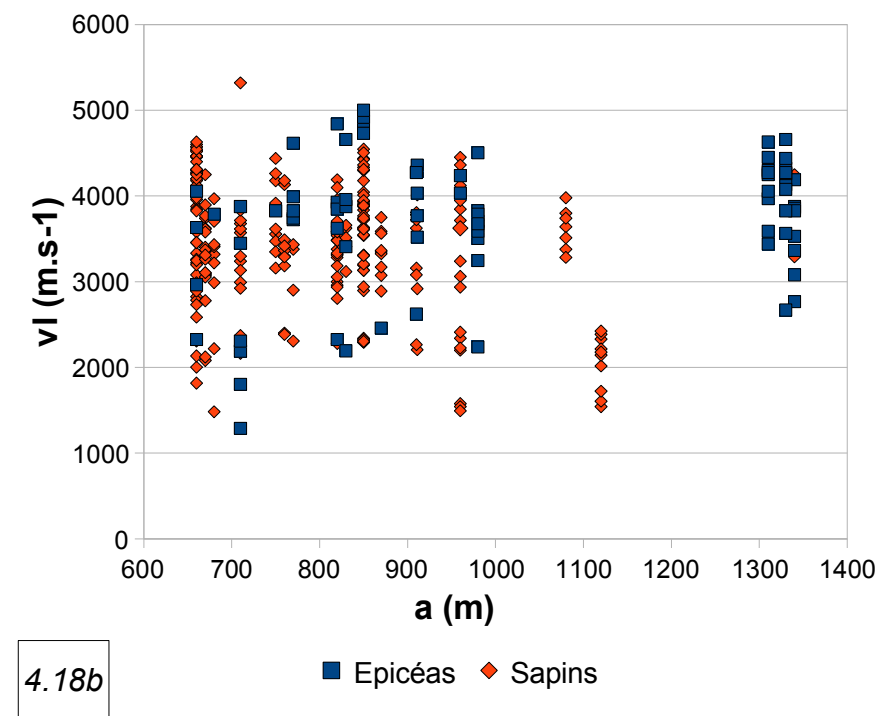
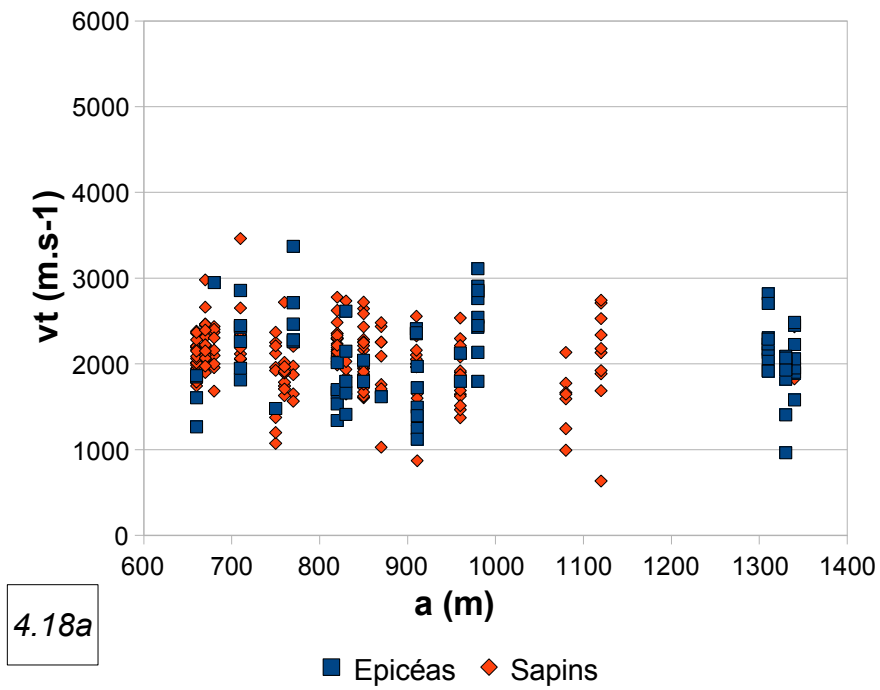
Les vitesses longitudinales pour les épicéas sont plus élevées que pour les sapins (*Figure 4.20b*). Cependant, aucune relation significative ne se dégage. Il existe une relation polynomiale entre la vitesse transversale et le volume exploitable par les racines d'un arbre donné, pour les stations ayant un pH_{eau} plus élevé (hors stations 11 et 25) (*Figure 4.20a*). Malgré un volume de sol prospectable important, les stations les plus pauvres présentent des vitesses transversales correspondantes aux sols les plus superficiels sur stations "riches".

La figure 4.21b montre une réduction de la variabilité des vitesses longitudinales d'une station en fonction du pH. Il en est de même pour les mesures transversales (*Figure 4.21a*). Une augmentation des vitesses transversales a été notée avec l'augmentation du pH de la station.

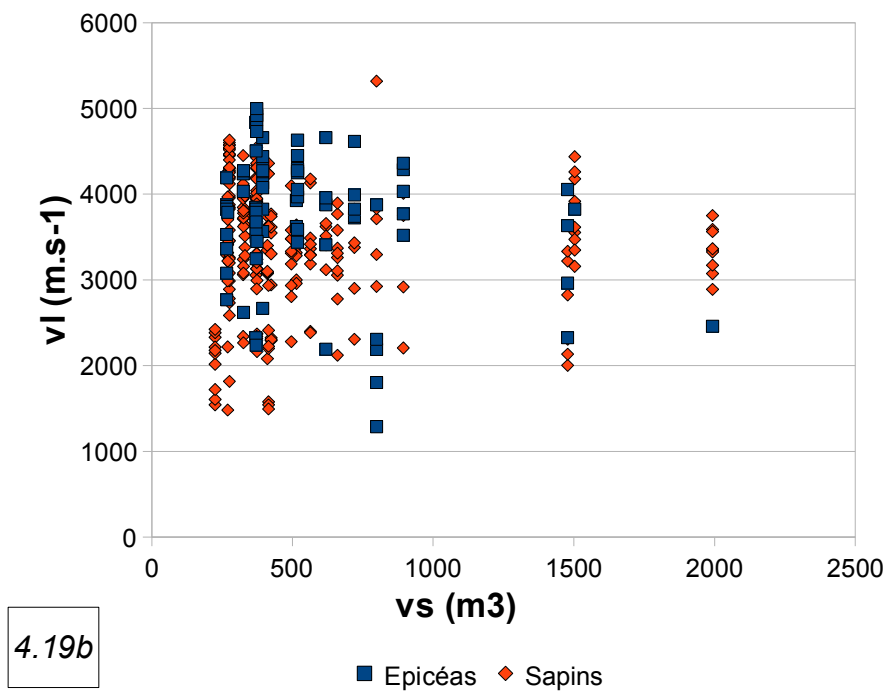
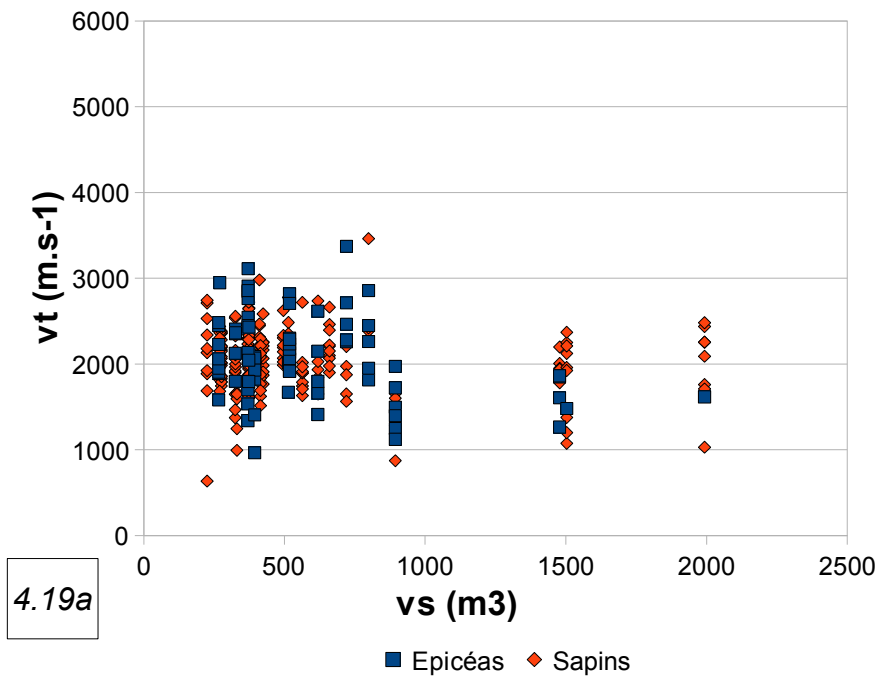
Les figures 4.22a et 4.22b reprennent le traitement effectué précédemment. La figure 4.22a montre qu'il existerait une relation entre la vitesse transversale et le pH_{eau}. La vitesse transversale augmente avec pH_{eau}. La figure 4.22b ne permet pas de montrer une relation entre les vitesses longitudinales et le pH_{eau}.



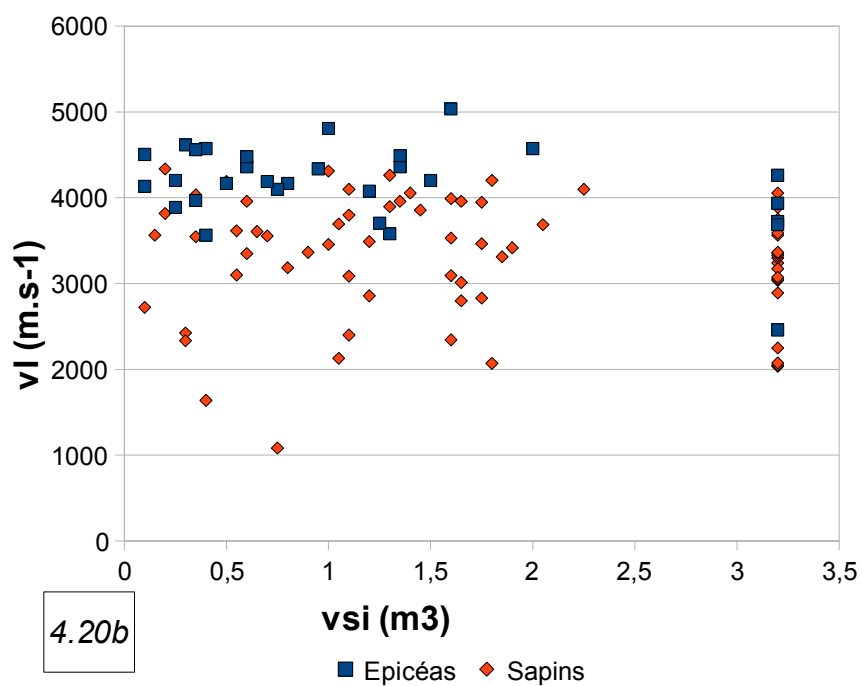
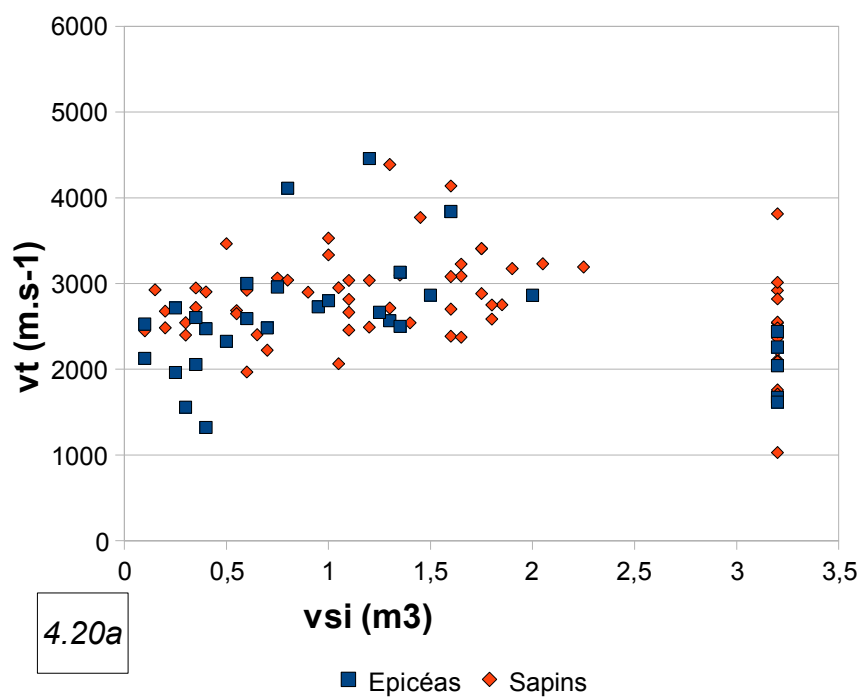
Figures 4.17a et 4.17b. Représentation du diamètre (d), de la hauteur (h) en fonction du volume de sol individuel (vsi) (sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu)).



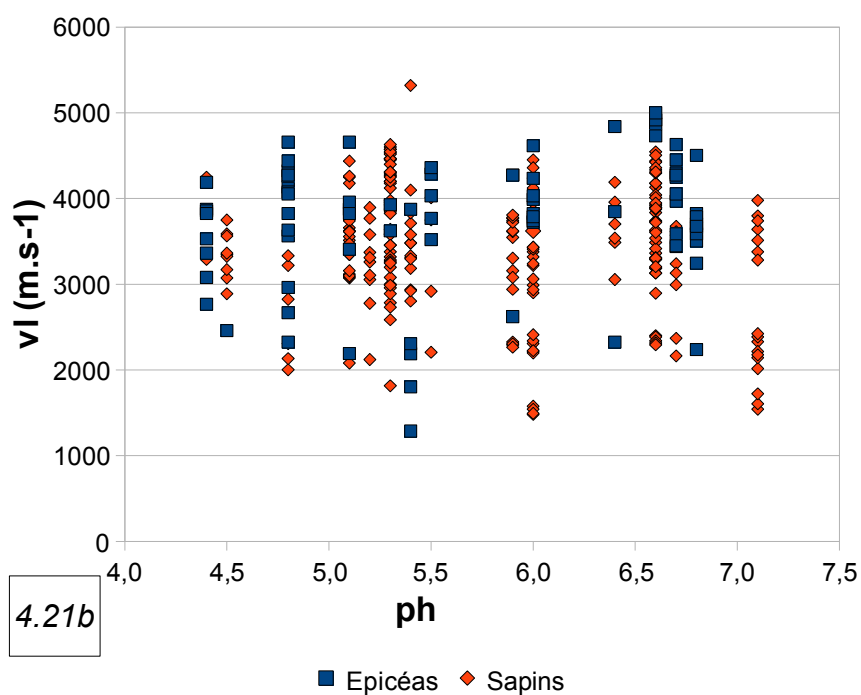
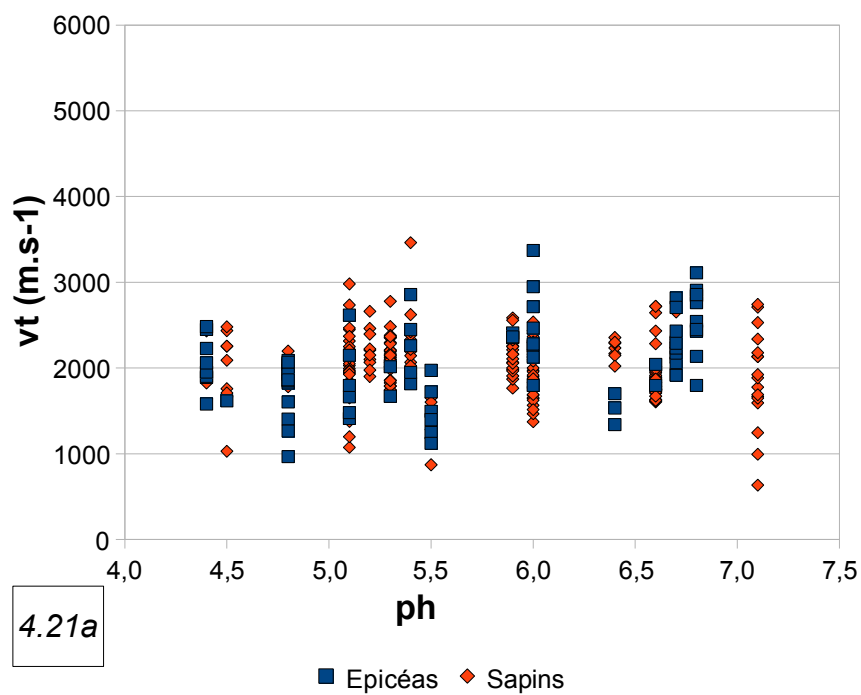
Figures 4.18a et 4.18b. Représentation des vitesses longitudinales (v_l) et transversales (v_t) en fonction de l'altitude (a) (sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu)).



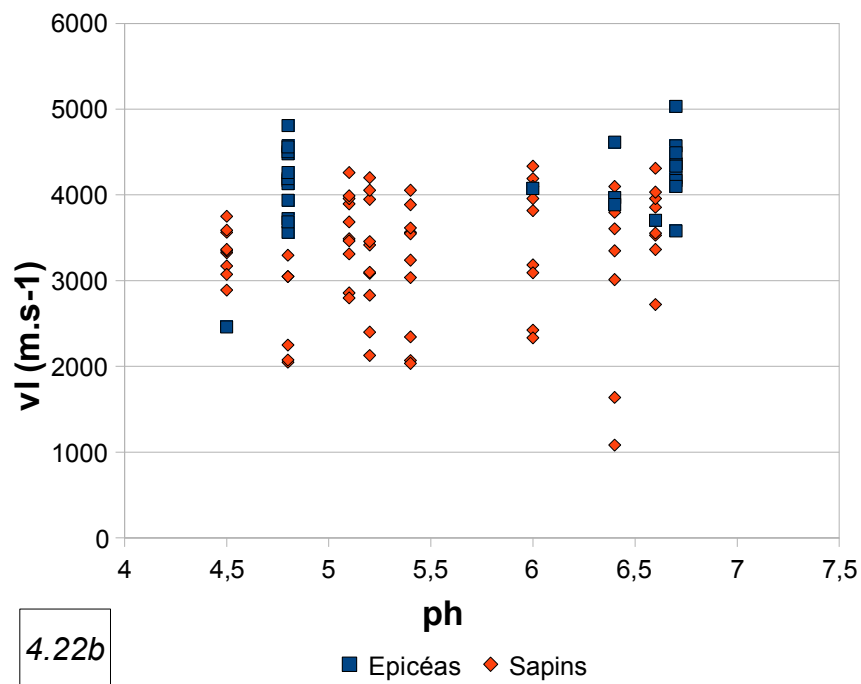
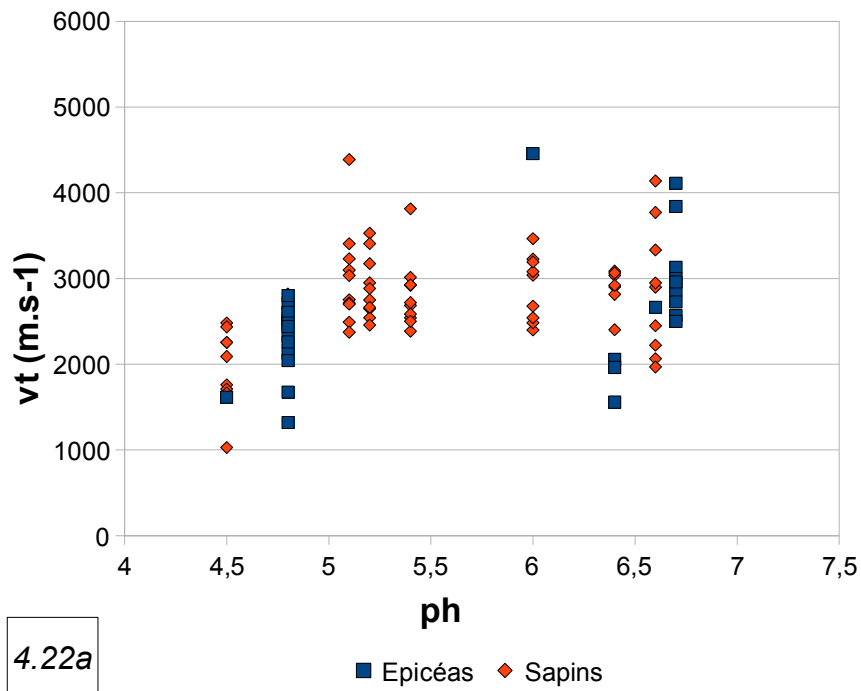
Figures 4.19a et 4.19b. Représentation des mesures des vitesses longitudinales (v_l) et transversales (v_t) en fonction du volume de sol de la station (v_s) (sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu)).



Figures 4.20a et 4.20b. Représentation des mesures des vitesses longitudinales (v_l) et transversales (v_t) en fonction du volume de sol individuel (v_{si}) (sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu)).



Figures 4.21a et 4.21b. Représentation des mesures des vitesses longitudinales (vl) et transversales (vt) en fonction du pH_{eau} de la station (ph) (sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu)).



Figures 4.22a et 4.22b. Représentation des mesures des vitesses longitudinales (vl) et transversales (vt) en fonction du pH_{eau} de la station (ph) pour la 2ème session de mesures (sapin (losange rouge) et épicéa (carré bleu)).

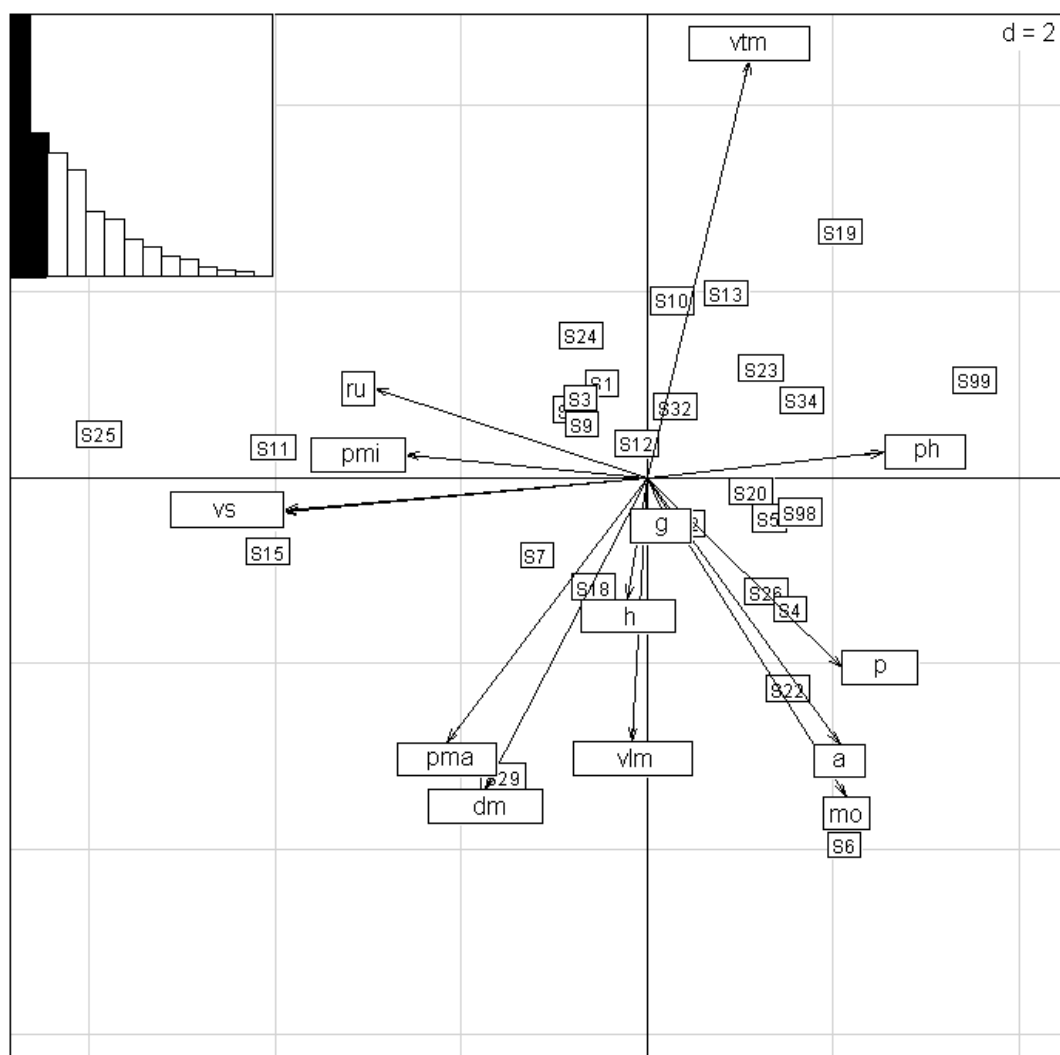


Figure 4.23. Analyse en composantes principales des paramètres stationnels (vs : volume de sol prospectable, vtm : vitesse transversale moyenne, vlm : vitesse longitudinale moyenne, ru : réserve utile du sol, ph : pH_{eau} moyen du sol pour les 60 premiers centimètres, h : degré d'hétérogénéité de la profondeur, a : altitude, hm : hauteur moyenne des arbres, dm : diamètre moyen des arbres, pm : profondeur moyenne, pma : profondeur maximale relevée sur la station, pmi : profondeur minimale relevée sur la station, p : pente, g : faciès de la roche, mo : sol dit « humifère », 27 stations)

Sur l'axe 1, le facteur pH_{eau} est opposé à la RU, à la profondeur minimale et au volume de sol total (Figure 4.23). Sur l'axe 2, la vitesse transversale moyenne s'oppose à la vitesse longitudinale, à l'hétérogénéité de la station et le type de géologie. Deux groupes de facteurs ont été notés : profondeur maximale et diamètre moyen ainsi que pente, altitude et matière organique. Les stations se répartissent principalement au centre de l'ACP. Certaines se regroupent selon le pôle « profondeur importante » (stations 11/15/25). La station 99, est fortement liée au pH élevé à l'opposé des stations sur sol profond. La

station 29 est fortement liée à la profondeur maximale et au diamètre moyen importants à l'opposé de la station 19. Les stations 22 et 6 s'individualisent grâce à l'altitude et au taux de matière organique mais perpendiculairement à la vitesse transversale.

Afin d'affiner les analyses, la deuxième session de mesures a été réalisée en précisant les paramètres pour chaque arbre échantillonné. Les analyses précédentes ont montré que les vitesses longitudinales ne permettaient pas de relever l'influence des paramètres écologiques.

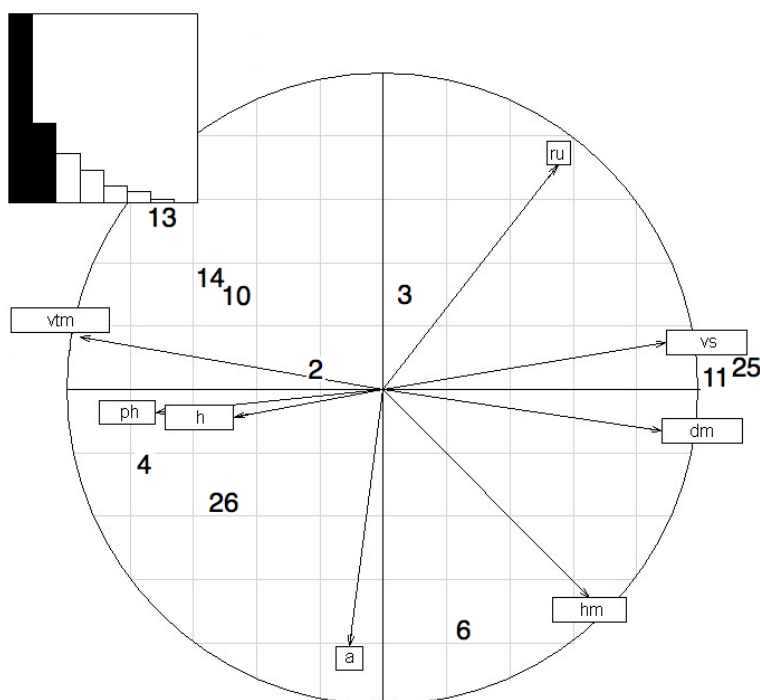


Figure 4.24. Analyse en composantes principales des paramètres stationnels (vs : volume de sol prospectable, vtm : vitesse transversale moyenne, ru : réserve utile du sol, ph : pH_{eau} moyen du sol pour les 60 premiers centimètres, h : degré d'hétérogénéité de la profondeur, a : altitude, hm : hauteur moyenne des arbres, dm : diamètre moyen des arbres, 10 Stations).

Sur l'axe 1 de l'analyse en composantes principales des variables stationnelles (Figure 4.24), des groupes de variables corrélés négativement ont été relevés. D'un côté, se regroupent, le « volume de sol » et le « diamètre moyen » alors que de l'autre, se regroupent « vitesse transversale moyenne », « hétérogénéité » et le « pH_{eau} ». Sur l'axe 2, seule « altitude » est représentée. Les variables « réserve utile » et « hauteur moyenne » n'est que très faiblement liées à cet axe. Les stations pourraient être réparties en trois groupes : les stations ayant un pH_{eau} faible et un volume de sol important (stations S11 et S25), 1 station d'altitude (S4) et les stations ayant une forte vitesse transversale et pH_{eau} élevé (S2/S3/S4/S10/S13/S14/S26).

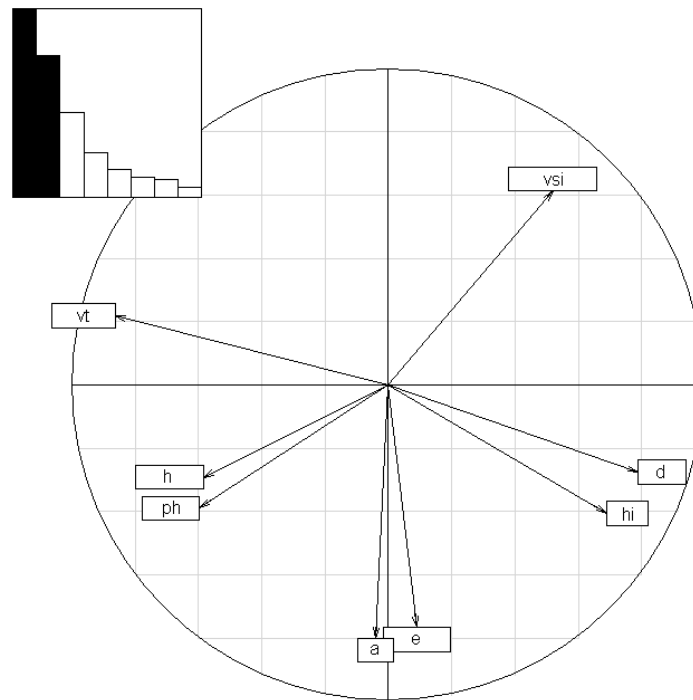


Figure 4.25. Analyse en composantes principales des paramètres individuels (vsi : volume de sol prospectable par arbre, vt : vitesse transversale, e : espèce, ph : pHeau moyen du sol pour les 60 premiers centimètres, h : degré d'hétérogénéité de la profondeur, a : altitude, hi : hauteur de l'arbre, d : diamètre de l'arbre, 10 Stations).

Sur l'axe 1 de l'analyse en composantes principales des variables individuelles (Figure 4.25), les « vitesse transversale » et « hétérogénéité » sont faiblement liées. Négativement corrélée, la présence de « diamètre » et de « hauteur ». Sur l'axe 2, « espèce » et « altitude » sont fortement corrélés. Indépendamment des axes, la corrélation négative de « volume de sol individuel » et de « pHeau » a été relevée. Les individus se répartiraient en trois groupes : le premier pôle traduisant une hétérogénéité et un pHeau élevés, le second ayant un volume de sol individuel important et le dernier, une valeur de vitesse transversale importante.

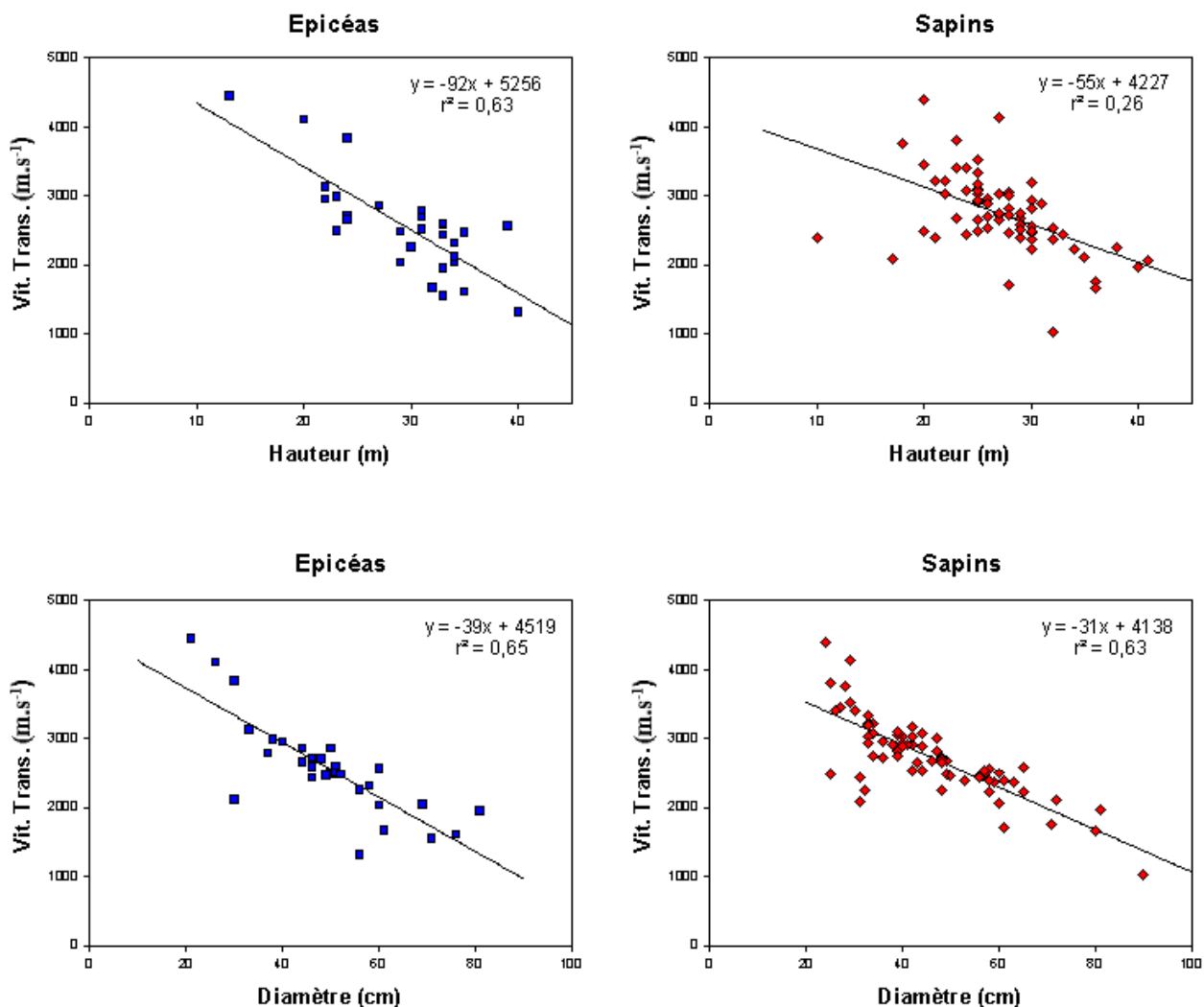


Figure 4.26. Vitesse transversale (v_t) mesurée en fonction de la hauteur (h), du diamètre (d) et de l'espèce de l'arbre (sapin et épicéa).

Le diamètre et la hauteur de l'arbre sont corrélés négativement avec la vitesse transversale (Figure 4.26). Le lien entre les variables est relativement fort ($r^2 > 0,60$), sauf pour la hauteur de sapins. Ce sont les arbres ayant le plus petit diamètre qui présentent une vitesse transversale plus élevée (Figure 4.26). Les résultats relevés pour les épicéas échantillonnés identiques à ceux enregistrés pour les sapins, le diamètre et la hauteur sont corrélés négativement et suivant le même ordre de grandeur.

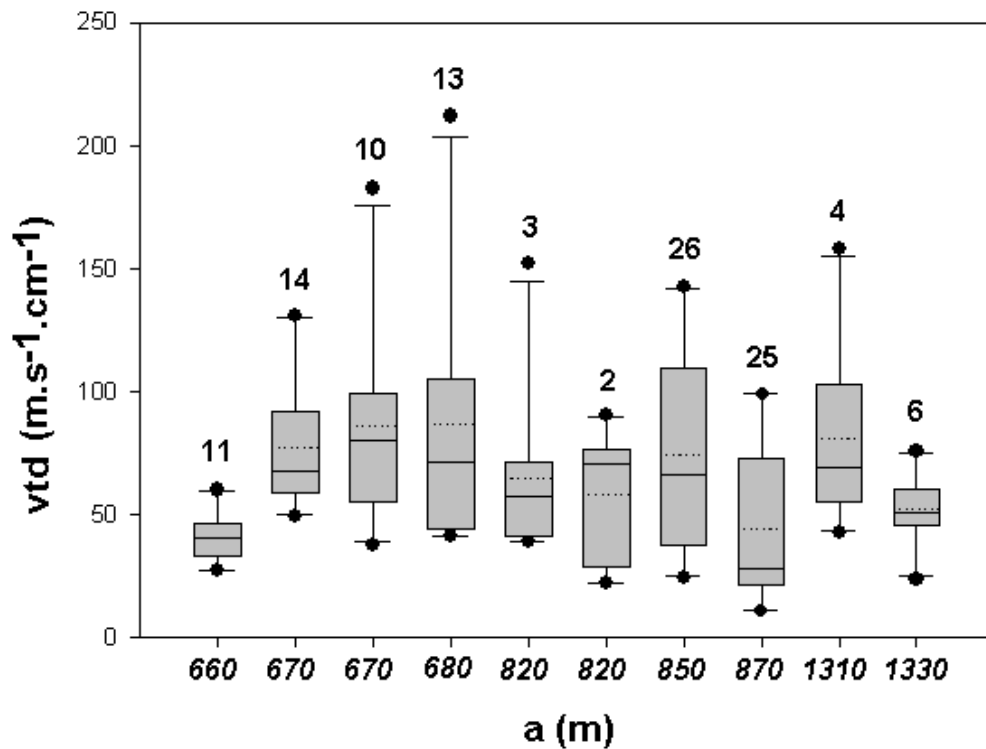


Figure 4.27. Indice « vitesse transversale pondérée » (vtd) en fonction de l'altitude (a) de la station (sapin et épicéa). Le trait plein à l'intérieur de la boîte à moustache correspond à la médiane. Le trait en pointillé représente la moyenne. Les stations sont représentées le long du gradient altitudinal, de 660 (station 11) à 1330 m (station 6).

La figure 4.27 montre qu'il n'existe pas d'effet « altitude ». Les stations ne se distribuent pas de façon continue. La dispersion des mesures au sein des stations est importante mais les moyennes de « vitesses transversales pondérées » sont comprises entre 40 et 80 $\text{m.s}^{-1}.\text{cm}^{-1}$.

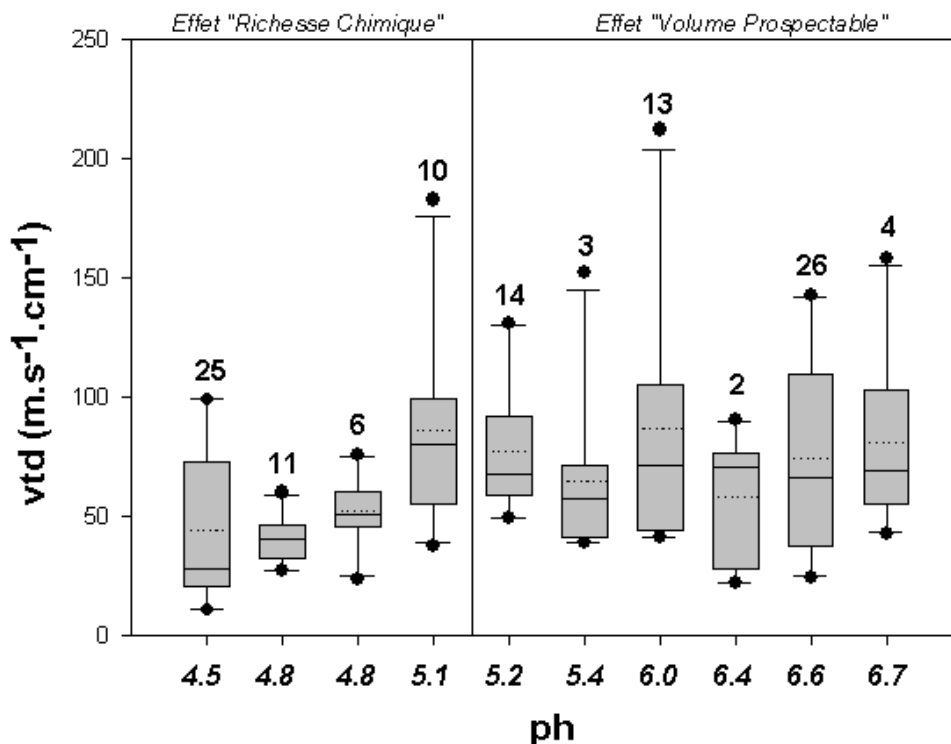


Figure 4.28. Indice « vitesse transversale pondérée » (vtd) en fonction du pH_{eau} moyen (dans les 60 premiers centimètres) (ph), pour les stations de la 2ème session de mesures (sapin et épicéa). Le trait plein à l'intérieur de la boîte à moustache correspond à la médiane. Le trait en pointillé représente la moyenne. Les stations sont représentées le long de la gamme de pH, de 4,5 (station 25) à 6,7 (station 4).

La figure 4.28 montre qu'il existe un effet « station » est plus important que l'effet « altitude ». Les stations se répartissent dans la gamme de pH_{eau} , 4,5 à 6,7. La vitesse transversale pondérée augmente jusqu'à un pH_{eau} de 5,1. Les stations présentant un volume de sol prospectable important, présentent également un pH_{eau} plus faible. A partir d'un pH_{eau} de 5,1, la présence d'éléments grossiers, en quantité importante, limite l'effet positif dû à l'augmentation du pH_{eau} .

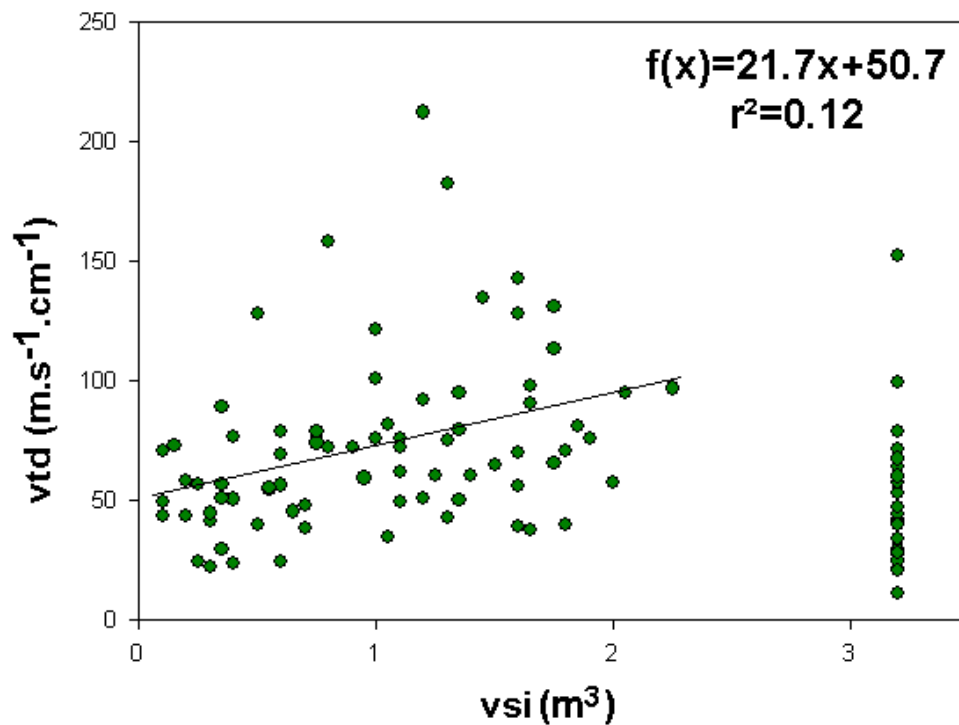


Figure 4.29. Indice « vitesse transversale pondérée » (vtd) en fonction du volume de sol disponible par arbre (vsi) (sapin et épicéa). Le nuage de points se répartit en 2 groupes. Les arbres sur sols profonds s'individualisent avec un volume individuel maximum (pas de contraintes physiques).

Il existe une relation entre le volume de sol individuel (vsi) et la vitesse radiale pondérée (vtd) (Figure 4.29). Malgré un volume de sol prospectable important, les stations les plus pauvres et plus profondes ($vsi > 3 \text{ m}^3$) présentent des vitesses transversales correspondantes aux sols les plus superficiels sur stations “riches”.

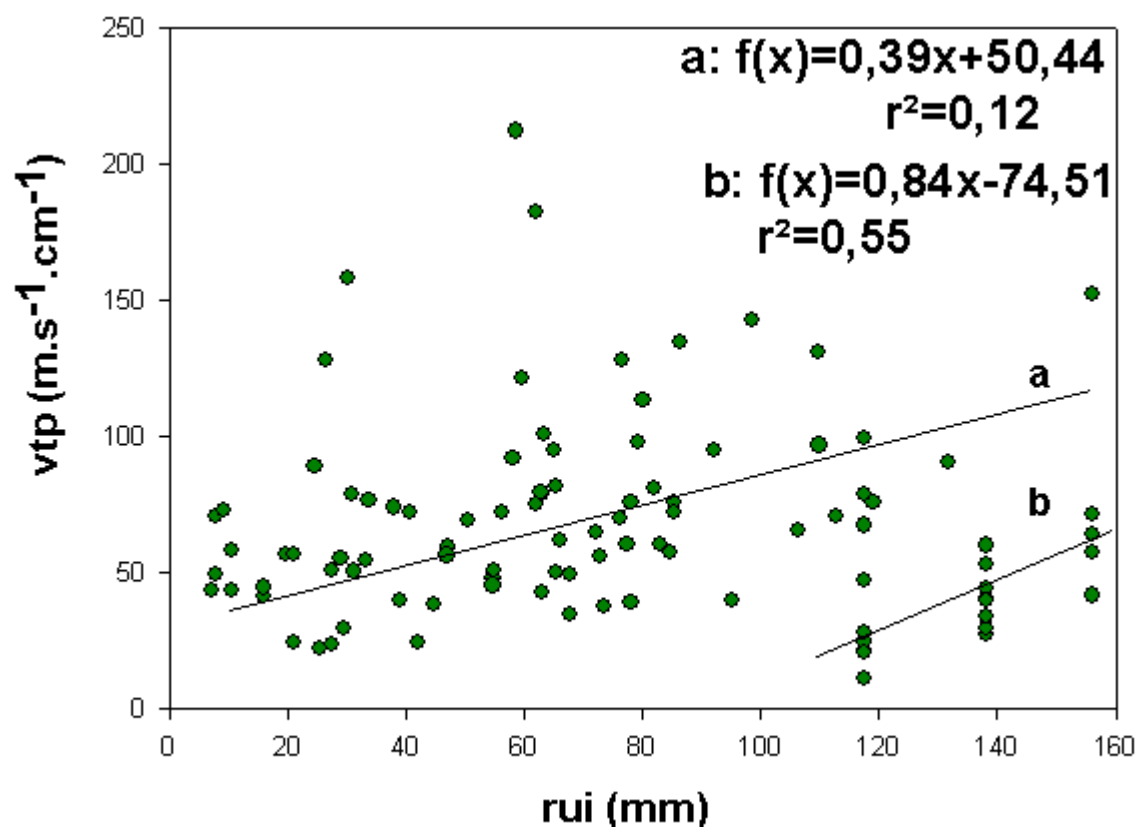


Figure 4.30. Indice « vitesse transversale pondérée » (v_{td}) en fonction de la réserve utile disponible par arbre (r_{ui}) (sapin et épicéa). Le nuage de points se répartit en 2 groupes (régressions a et b).

Bien que la réserve utile soit liée au volume de sol prospectable, il ne permet pas d'ajouter un niveau de précision supplémentaire avec la texture (Figure 4.30). Les arbres présentant un volume de prospectable important s'individualisent grâce à la texture de leur station. Il n'y a pas de vide dans la partie intermédiaire correspondant aux « vsi » entre 2 et 3 m^3 (Figure 4.29). Le nuage de points se divise en deux groupes : les sols caillouteux (régression a) et les sols profonds (régression b).

4.4. Données météorologiques

Le collecte des données météorologiques a été difficile par les contraintes liées aux travaux sur le terrain.

Les enregistreurs de température (*Hobo®*) ont mal supporté les conditions climatiques du massif, sans oublier les dégradations par la faune sauvage. Seulement une petite partie de données ont pu être collectées puisque les piles au lithium ont été rendues hors-service.

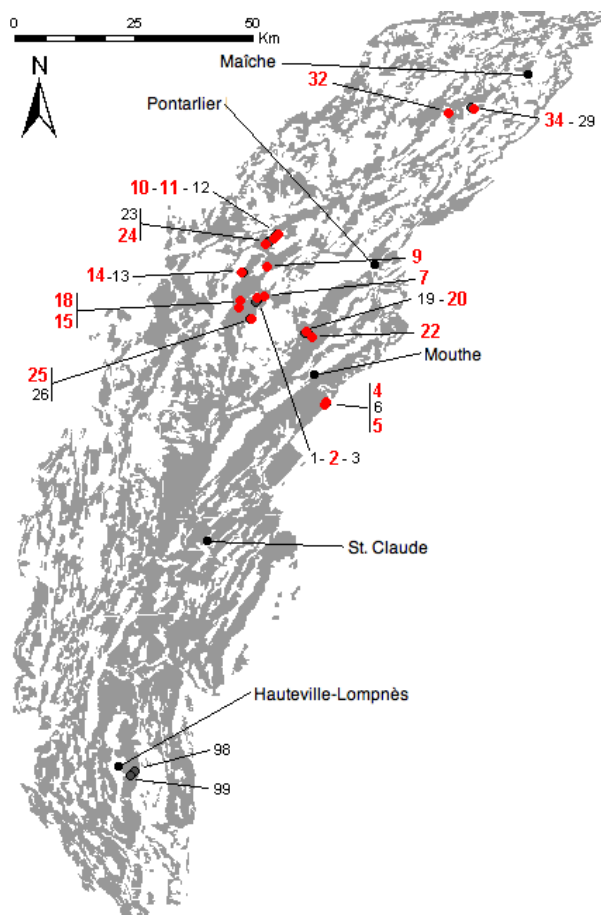


Figure 4.31. Localisation des 16 stations comportant des enregistreurs de température (*Hobo®*).

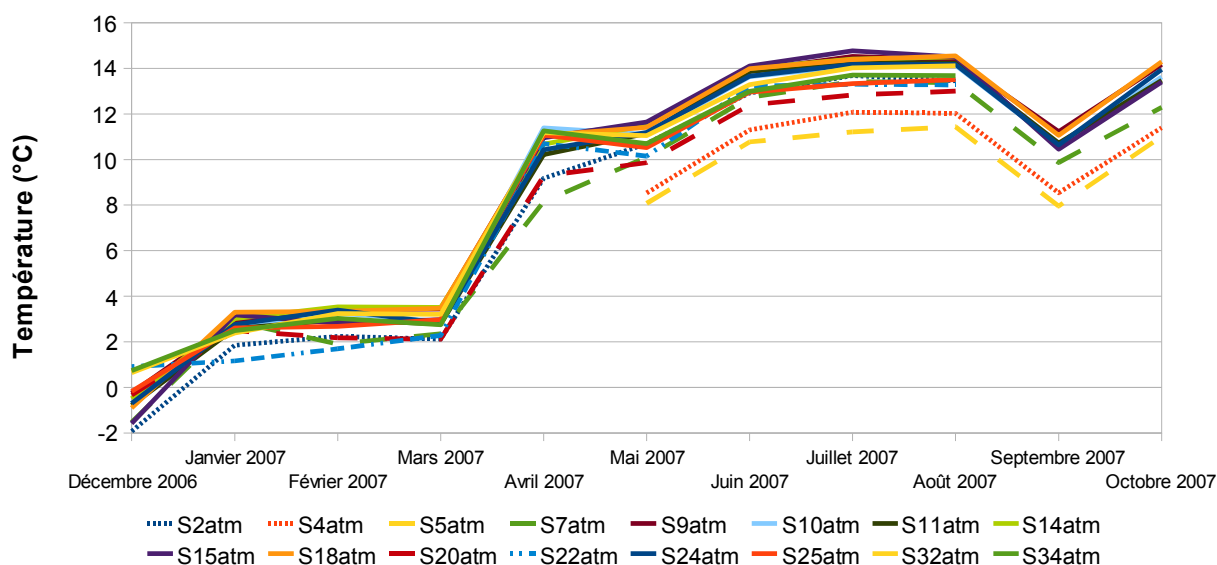


Figure 4.32. Variation annuelle de la température atmosphérique enregistrée par sonde Hobo® en fonction du temps (moyenne mensuelle, S_{atm} : sonde de température atmosphérique pour la station i).

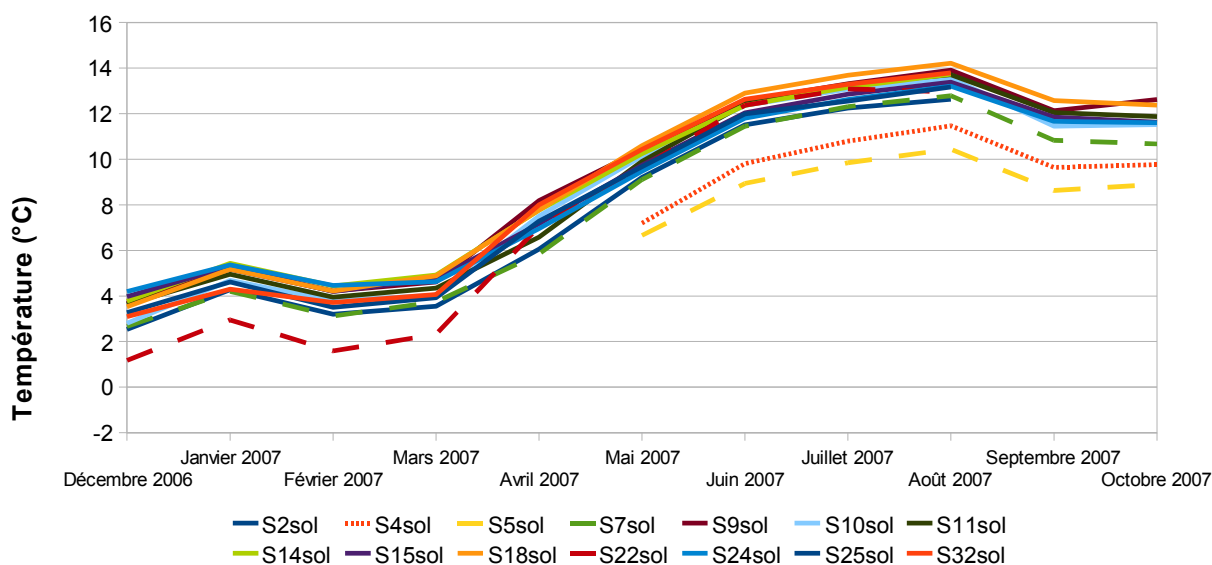


Figure 4.33. Variation annuelle de la température du sol enregistrée par sonde Hobo® en fonction du temps (moyenne mensuelle, S_{sol} : sonde de température du sol pour la station i).

L'évolution de la température atmosphérique et de la température du sol montre un parallèle correspondant variation du climat général (Figures 4.32 et 4.33). Il a été relevé une amplitude de 3 degrés environ entre la station la plus froide et la station la plus chaude (pour le sol ou pour l'atmosphère). La plus grosse amplitude de température du sol a été relevée pour la station 22. Cela peut être dû aux cailloux et au profil mis à nu. Les stations les plus froides sont celles du Risol qui se trouvent aux altitudes les plus élevées et orientées nord-ouest.

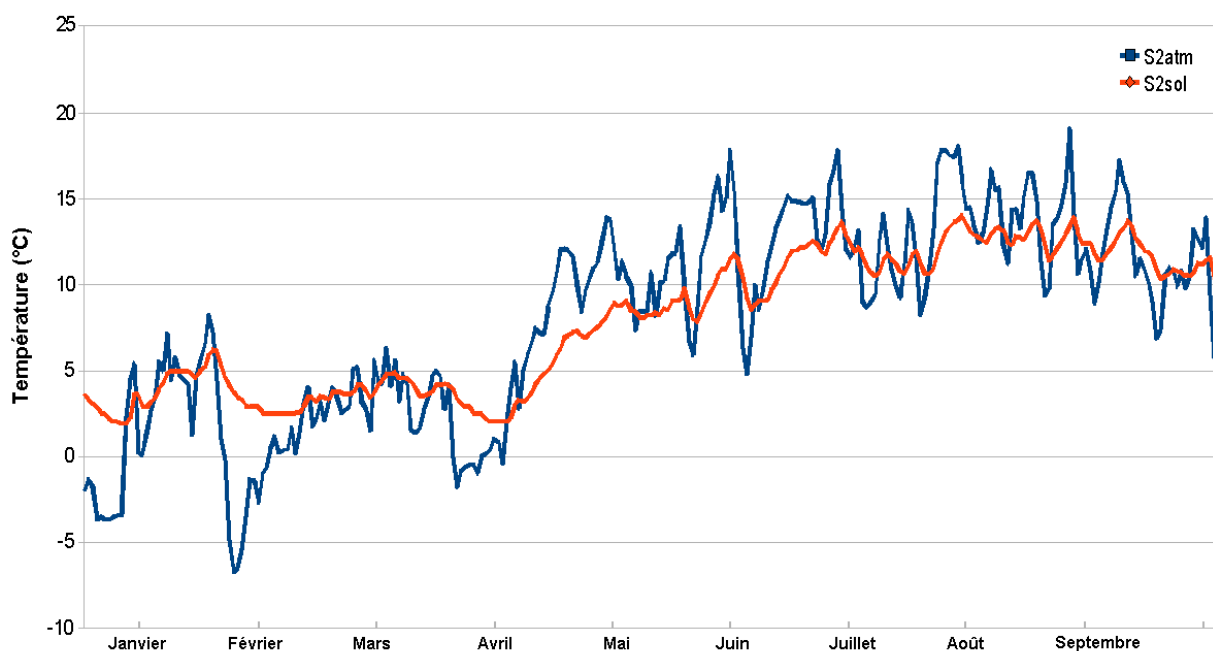


Figure 4.34. Variation annuelle de la température atmosphérique (courbe bleue) et de la température du sol (courbe rouge) enregistrée par sonde Hobo® en fonction du temps sur la station 2 (moyenne journalière, S2atm : sonde de température atmosphérique pour la station 2, S2sol : sonde de température du sol pour la station 2).

La figure 4.34 confirme les tendances du climat général. Les variations de la température du sol sont moins importantes que celle de l'atmosphère. La température du sol répond à la variation de la température atmosphérique avec un temps de latence. Les faibles amplitudes de température du sol sont la conséquence du pouvoir tampon du sol.

Les analyses qui suivent cherchent à comparer des stations proches géographiques mais suivant des positions topographiques différentes.

La figure 4.35 montre que les courbes des deux stations se superposent malgré la position topographique « en cuvette » de la station 11. Un léger décalage a été mis en évidence pendant le mois de mai. Les températures de la station 10 étant supérieures de 2 degrés à celles de la station 11.

L'installation des sondes dans les stations du Risol a été plus tardive (conditions d'accès difficiles à cause des conditions météorologiques) (Figure 4.36). Il existe un décalage de température entre les basses (Station 2) et les hautes (Station 5) altitudes. L'écart est toutefois plus important pour les températures des sols.



Figure 4.35. Variation quotidienne de la température atmosphérique (courbe bleue) et de la température du sol (courbe rouge) enregistrée par sonde Hobo® en fonction du temps sur les station 10 (s10atm et s10sol) et 11 (s11atm et s11sol) (moyenne journalière).

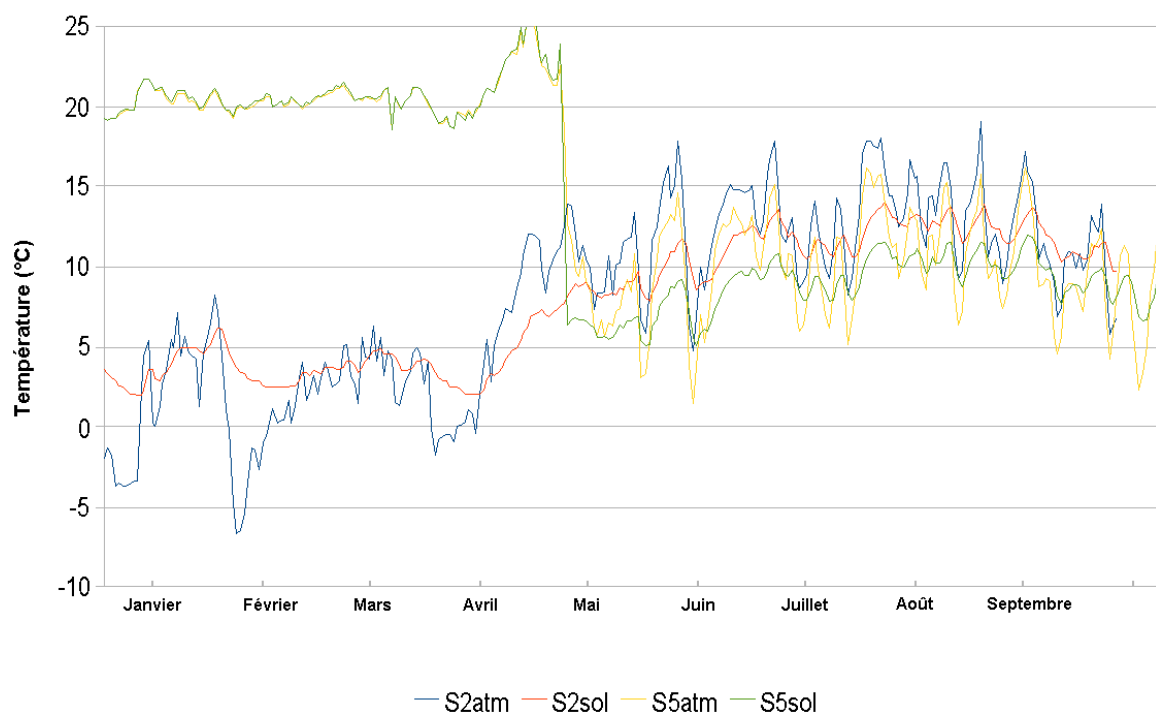


Figure 4.36. Variation quotidienne de la température atmosphérique (courbe bleue) et de la température du sol (courbe rouge) enregistrée par sonde Hobo® en fonction du temps sur les station (s2atm et s2sol) et 5 (s5atm et s5sol) (moyenne journalière).

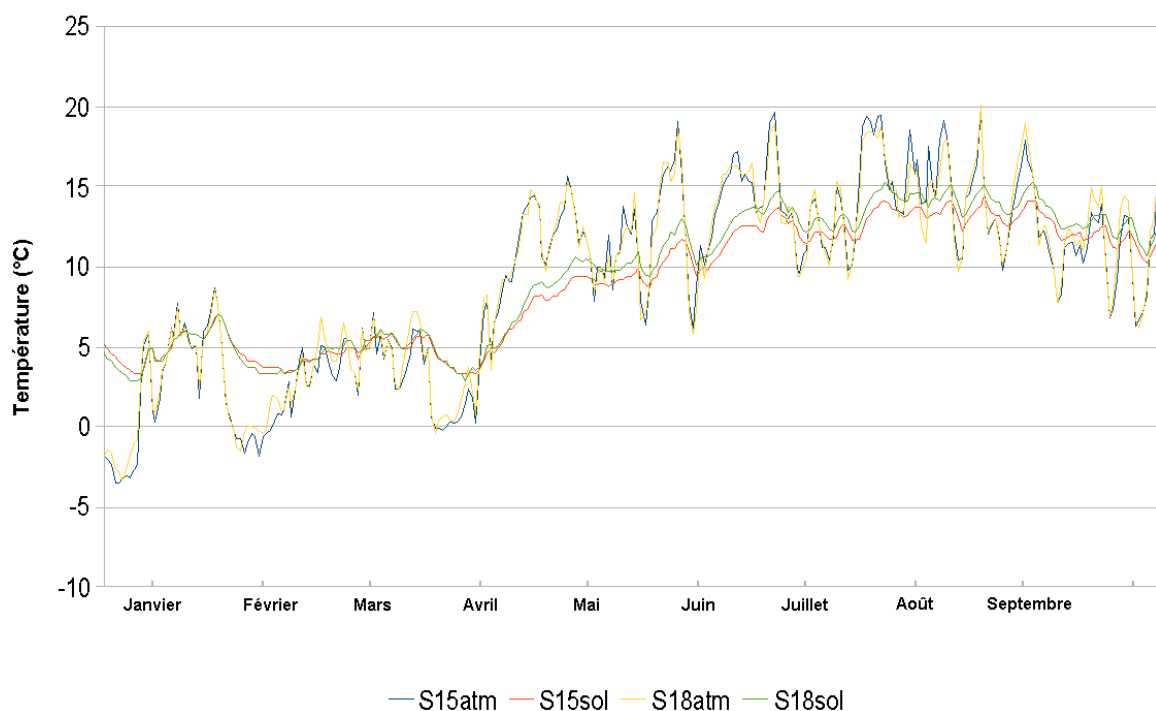


Figure 4.37. Variation quotidienne de la température atmosphérique (courbe bleue) et de la température du sol (courbe rouge) enregistrées par sonde Hobo® en fonction du temps sur les station 15 (s15atm et s15sol) et 18 (s18atm et s18sol) (moyenne journalière).

La figure 4.37 montre que pour les deux stations (15 et 18), proches géographiquement, les courbes de températures atmosphériques sont superposées. Les courbes de température du sol sont décalées. Ces différences sont la conséquence de la pierrosité des sols qui joue un rôle important sur le pédoclimat.

5. Discussion.

Tuovinen (2005) a montré une réponse de la densité et de la largeur des cernes en fonction du climat, pour le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Il existe une forte influence des précipitations en juin et des températures en milieu d'hiver (décembre, janvier) et de mars. Une moyenne de température basse en avril et des précipitations adéquates en mai et de la chaleur en juillet entraînent la production des cernes épais. Une longue et chaude période de végétation entraîne la production des cernes denses. Andreassen et al. (2006) ont montré les variations de croissance des épicéas en fonction des conditions météorologiques. Le diamètre de l'arbre est influencé par la saison de végétation. La météorologie en juin est prépondérante et deux types de réponses opposées ont été mises en évidence : la croissance est limitée par les précipitations de juin en plaine, mais, c'est la température en juin qui préfigure pour les altitudes les plus élevées. A cause des plantations, l'épicéa est présent partout et peut être sujet à ces contraintes climatiques.

Nous ne pouvons pas conclure à une relation entre la vitesse transversale pondérée et l'altitude. La variabilité intra-stationnelle ne permet pas non plus de conclure à une relation. La différence importante, relevée entre deux stations proche géographiquement, serait due au changement du type de substrat. La station 25 présente un sol avec une

texture fortement dominée par les limons alors que la station 26, présente une texture plus argileuse. Il s'agit ici d'un contexte très particulier où les apports de limons ont été très importants. Le contexte local présentant des calcaires durs avec des lapiaz affleurant par endroit (*BRGM, 1957, 1967*). Pour Bert (1993), il existe une relation entre la qualité du bois et l'altitude sous forme d'influence climatique (diminution de la période de végétation, température, précipitations, ...) plutôt que la qualité de la station. Cependant, Curt et Marsteau (1997) ont montré l'importance des systèmes géo-pédologiques pour la production forestière. Leurs analyses multivariées ont permis de mettre en évidence plusieurs unités géo-pédologiques distinctes avec des différences principalement dues au faciès lithologique (matériel parental et sol). Les tests statistiques ont également confirmé la forte liaison entre la hauteur des arbres et les unités géo-pédologiques.

Malgré la présence de roche calcaire dans la majorité de nos stations, les sols ne présentent pas de calcaire actif en grande quantité dans leur profil. Nous n'avons pas rencontré de sols carbonatés très humifères pourtant courants dans les forêts résineuses montagnardes (*Duchaufour, 2001*). Outre le leptosol lithique de la station 6, les sols des stations d'étude sont de type « cambisols » (eutrique humique et gleyique) et « luvisols » (haplique, haplique gleyique). L'absence des sols carbonatés très humifères ne vient pas d'une insuffisance de l'échantillonnage mais du contexte typique du massif du Jura et à la localisation de la forêt résineuse.

Les stations d'étude se répartissent le long du gradient altitudinal de 650 à 1350 mètres. Le volume de sol prospectable (par arbre et stationnel) et la variabilité diminuent en même temps que l'altitude augmente. Dans le Jura, la proportion de sols superficiels augmente avec l'altitude. A conditions pédologiques voisines (sols riches, pH élevés), plus l'arbre aura le volume suffisant au développement de ses racines et plus la densité du bois sera élevée. Il est donc plus probable de rencontrer des arbres (station) plus denses en altitude. Le volume du sol aurait donc plus d'influence que l'altitude puisqu'à volume de sol équivalent, il n'y aurait pas de différence entre les altitudes variables. La production est meilleure sur sols profonds et dépourvus de cailloux (grès, calcaires gréseux), tout en notant l'importance du calcaire actif. La texture équilibrée est la plus adéquate alors que les sols sur calcaires durs et massifs sont les moins productifs.

La variabilité inter- et intra-stationnelles des propriétés des sols joue un rôle majeur dans la réponse de densité des arbres. A l'échelle de la station, les différences de réserve utile, d'un arbre à un autre, entraîne des réponses différentes. Il a été montré que l'effet positif de la nutrition minérale pouvait être limité par la présence d'éléments grossiers, jouant un rôle sur l'assise de l'arbre mais surtout sur une diminution de la réserve utile individuelle. Les stations les plus hétérogènes sont plus à même de présenter une variabilité importante de la densité de leurs arbres. Nos résultats ne montrent pas de lien entre l'hétérogénéité spatiale de la profondeur et la variabilité des densités mesurées sur la station. Les arbres ne sont pas répartis de façon régulière dans la station. Cela démontre l'importance d'une connaissance de la variabilité des propriétés des sols à une échelle très fine. Le choix de traiter le « volume prospectable » permet de mettre en relation les paramètres profondeur/obstacle avec le système racinaire. L'amplitude de profondeur est plus marquée dans les stations présentant les lapiaz. Dans ces stations, le volume de sol est peu important mais les racines peuvent trouver des zones où le sol est plus profond. Par conséquent, notre échantillonnage systématique de la profondeur sous-estime le volume réel du sol de la station. La profondeur peut être biaisée par la présence de cailloux ou de blocs, à échelle très fine. La prédiction de la densité du bois est rendue

difficile pour les stations les plus hétérogènes. D'après Sanchez-Rodriguez *et al.* (2002), sur *Pinus radiata*, ce sont les facteurs édaphiques tels que la profondeur du sol et disponibilité des nutriments qui influenceraient la productivité. La profondeur du sol et la disponibilité des nutriments sont les facteurs les plus influents sur la nutrition et la croissance. Les sols supérieurs à 60 centimètres sont les mieux adaptés. D'après Bert (1993), sur les sols sur bancs calcaires ou éboulis, très drainants, la hauteur moyenne est de 26 mètres. Sur les sols bruns calciques ou plus argileux, la hauteur est seulement de 20 mètres. Sur les sols bruns limoneux, lessivés, acides (avec une meilleure réserve utile), la hauteur moyenne est de 30-31 mètres.

Nos résultats ont montré que les valeurs de réserve utile individuelles n'ont que peu d'influence sur la vitesse pondérée. Dans le contexte jurassien et à cette gamme d'altitude, il n'y a pas d'effet « sécheresse ». La faible réserve utile est compensée en altitude par des précipitations plus importantes et une répartition régulière au sein du massif (*meteofrance.com*). Les sols ayant une moindre réserve utile ont des conditions proches de ceux qui sont situés à des altitudes plus basses, avec une bonne réserve utile. D'après Gras (1994), la présence d'éléments grossiers est bénéfique sur la productivité végétale en agissant sur la structure et le fonctionnement hydrique du sol. Les propriétés des sols caillouteux sont intermédiaires entre celles de la terre fine et celles des cailloux. L'augmentation de la température en été est relevée dans les sols caillouteux. L'effet est positif sur le sol. Pendant la nuit, le sol sans cailloux a la température la plus élevée. Cette dernière observation est particulièrement pertinente pour les stations présentant des lapiaz. Curt *et al.* (1996) confirment l'idée que le réservoir en eau du sol conditionne fortement l'indice de fertilité pour les peuplements de sapins et d'épicéas, malgré une étude réalisée dans un contexte pédologique homogène. D'après Lucot et Gaiffe (1994), la présence des éléments grossiers entraîne une modification de la structure du système racinaire. Les racines se développent dans les 20 premiers centimètres du sol. Cette particularité morphologique présente une contrainte moins intense pour l'épicéa compte-tenu de son système racinaire traçant (Rameau *et al.*, 1993).

Il existe une influence du paramètre « nutrition ». Nos résultats concernant le pH_{eau} ont montré que la richesse du sol conditionne la densité du bois. Une station présentant un pH élevé présentera des arbres ayant une densité plus forte. Ils sont à même de constituer des cernes plus résistants. Nous sommes en accord avec Bert (1993) qui a montré que la densité était supérieure pour les arbres des stations les plus fertiles. En moyenne, les arbres des stations à pH faible, auront des valeurs de vitesses radiales pondérées plus faibles. La répartition des variables, selon l'analyse en composantes principales, confirme l'idée que nos données respectent les relations entre les paramètres édaphiques. Le pH élevé n'est pas corrélé avec les sols les plus profonds et la réserve utile diminue avec l'altitude en lien avec la nature de la roche (calcaires durs). L'altitude ne présente aucun lien direct avec la vitesse transversale pondérée. La réserve utile peut être croisée avec le type de substrat (drainage important ou non) car cela peut accentuer ou non un déficit hydrique. Le bois final étant deux fois plus dense que le bois initial, et que la saison de végétation est moins longue en altitude, la proportion de bois final est plus importante.

Les arbres au diamètre plus important (probablement les plus âgés) ont des vitesses transversales plus faibles. Les contraintes exercées sur les jeunes arbres, pourraient être à l'origine de cette différence de densité avec les arbres plus âgés. La compétition pour la lumière, le climat, donc la durée de la saison de végétation sont déterminants. Cela est bien confirmé par la variabilité de nos données. Il existe une grande variabilité de valeur

de vélocité acoustique. Chauhan et Walker (2006) ont montré que les variables de densité du bois ne présentent pas de relation avec la vélocité acoustique (ou son modèle d'élasticité), mais c'est l'âge qui entre en jeu. Picard et Bar-Hen (2002) ont montré qu'il existe une corrélation spatiale entre la surface terrière et l'accroissement cela peut être un indicateur de compétition. Les individus les plus gros sont répartis de façon régulière indépendamment des petits qui sont répartis en agrégats. Il est nécessaire de tenir compte de la gestion par les forestiers qui peut se tourner vers l'élimination ou non des plus gros bois (communications personnelles de forestiers, Forêt de la Joux).

Nos résultats ont montré que les plus gros arbres présentent une densité moins importante que les plus petits. Il est attendu par Bert (1993) que le bois final soit plus dur que le bois initial. Cela pourrait venir de la proportion de bois dense moins important avec l'âge (de façon relative). Les cernes étant plus étroits avec l'âge, il y aura par conséquent, moins de bois "final".

Nos résultats montrent que le diamètre et la hauteur sont corrélés avec la vitesse transversale. Plus l'arbre sera gros, donc âgé, et plus la densité mesurée sera faible. Ces résultats s'opposent à ceux de Bert (1993) pour qui la densité augmente avec l'âge, par rétrécissement des cernes. Nos résultats s'opposent également à ceux de Chauhan et Walker (2006) qui ont montré que la vitesse est supérieure dans les vieux arbres et ceux qui présentent un gros diamètre. L'âge des arbres est une limite de l'étude stationnelle. En effet, la mise en place d'un protocole spécifique s'est avéré trop lourd et n'a pu être envisagé. Les différences inter-spécifiques qui ont été mesurées, pourraient provenir de la différence d'amplitude altitudinale. De plus, les épicéas échantillonnés sont souvent de diamètre important par rapport aux sapins.

Nous avons montré que la densité était plus forte pour les arbres ayant le diamètre le plus faible. Une contrainte en début de vie (profondeur, accès à l'eau) pourrait entraîner la formation de jeunes arbres, le sol étant néanmoins riche. L'approche individuelle est intéressante car elle permet de prévoir la densité de chaque arbre en reprenant les paramètres les plus influents. Les cartes en 3-dimensions confirment que la profondeur du sol est une variable très hétérogène très localement. Le pH_{eau} (richesse de la station) a été associé au le volume de sol que l'arbre pourra coloniser avec son système racinaire (assise et réserve utile). Les deux paramètres reflétant les deux échelles (stationnelle et individuelle) sont nécessaires pour arriver à une prédiction. Nous avons mis en évidence deux situations, les stations « riches » plus superficielles (faible réserve utile) et les stations « pauvres » profondes. Les paramètres se compensent et entraînent une homogénéisation. Une bonne production (croissance importante et rapide), n'est pas synonyme d'un bois dense. Bergès *et al.* (2008) ont montré les effets des facteurs écologiques sur la croissance radiale et la qualité du bois de chêne sessile. Les facteurs écologiques ont un effet faible sur la densité qui est indépendante de la largeur. Il n'existe pas de corrélation entre la largeur de la section et la densité moyenne. Cela est la conséquence des effets opposés des facteurs liés à l'eau sur le bois final (proportion et densité). Ce sont les facteurs climatiques qui influenceraient la densité du bois. Bert (1996) n'a pas montré de différence de croissance lorsque les conditions de profondeurs varient. Curt *et al.* (2001) ont montré, pour le Douglas, que la biomasse de racines fines est maximale dans les sols n'ayant pas de contraintes majeures. A l'inverse, les corrélations seront négatives pour le faciès de la roche. Wang et Shao (2006) ont étudié l'infiltration dans les sols caillouteux en affirmant que les sols forestiers étaient souvent caillouteux. Lorsque le diamètre était supérieur à 25 mm, il devient favorable aux

écoulements de l'eau.

Les analyses en composantes principales ont confirmé nos résultats en situant les différents paramètres les uns par rapport aux autres. Deux pôles s'individualisent, un pôle « pH élevé » (nutrition) et un pôle « Volume stationnel élevé » (pierrosité). L'indice d'hétérogénéité est corrélé au volume stationnel faible montrant ainsi que les stations les plus superficielles ne sont pas homogènes lorsque l'on considère la profondeur du sol. L'obstacle relevé sur ces stations entraîne cette hétérogénéité très locale. A l'opposé, des stations s'individualisent lors du traitement de nos résultats, forment le pôle « Volume stationnel élevé ». Il est important de noter le lien fort qui existe entre la réserve utile et le volume de sol prospectable. La position de l'altitude confirme l'absence de lien entre ce facteur et la vitesse transversale moyenne. La hauteur moyenne ne présente aucun lien avec les paramètres précédents. Le choix de la pondération de la vitesse par le diamètre de l'arbre était bien une solution plus judicieuse. Corona *et al.* (1998) ont étudié les relations entre les facteurs environnementaux sur le pin de Douglas. L'influence des facteurs climatiques (température et précipitations), topographiques (altitude, exposition, pente) et pédologiques (pH, texture) a été montrée. Les facteurs climatiques sont les plus importants étant donné leur lien avec le bilan hydrique, accentués par la topographie et le sol. Pour terminer, nos résultats ont montré que les arbres échantillonnés se situaient au-dessus de la courbe de référence attendue (CBT). Toute station confondue, les données de qualité appartiennent aux classes de hautes performances.

Curt et Marsteau (1997) ont étudié la production forestière à travers les systèmes géopédologiques. Les différences viennent principalement du faciès lithologique et du sol. La production est meilleure sur les sols profonds et dépourvus de cailloux (grès, calcaires gréseux). Ce paramètre peut s'avérer limitant en grande quantité, pour la croissance des résineux.

Les résultats ont montré que le pH, la texture et la profondeur du sol se présentent comme les paramètres qui conditionnent, de façon importante, la densité des bois résineux. La nature de la roche sous-jacente et la pente sont en lien direct avec ses paramètres. Or, la cartographie des sols (cf. chapitre 3) a été élaborée à partir des paramètres topographiques et géologiques. Les données stationnelles peuvent ainsi être mises en parallèles avec les unités cartographiques, selon leur contexte écologique.

6. Conclusion.

Il a été montré qu'il existait une influence significative de la richesse nutritive de la station (pH_{eau}) et de la réserve utile individuelle (en lien avec le volume individuel de sol prospectable) sur la densité du bois de résineux dans le massif du Jura. Les arbres présentent une densité plus importante lorsqu'ils sont localisés sur des stations au pH_{eau} élevé et ayant accès à un volume de sol important pour le développement de leur système racinaire et ayant une disponibilité de l'eau suffisante, les valeurs faibles étant compensées par une bonne quantité de précipitations. La connaissance de la variabilité des propriétés des sols est primordiale dans la prédiction de la densité du bois.

La répartition des stations d'étude a permis de montrer qu'il n'existait pas d'effet de l'altitude. A conditions pédologiques voisines, il n'y aura pas de différence entre 2 stations à des altitudes différentes. C'est l'augmentation de la proportion de sols superficiels avec l'altitude qui peut faire penser à un effet « altitude ».

Pour compléter cette étude, il serait intéressant d'étendre le nombre de stations afin d'affiner le modèle, tout en ajoutant la variable « âge » aux résultats obtenus.

Cette étude stationnelle portant sur l'influence des paramètres écologiques a permis d'apporter des informations complémentaires à la description des unités de sols spatialisées dans le chapitre 3.

Chapitre 5 : Zonage des potentialités sylvicoles

1. Introduction.

Les chapitres précédents ont permis, par la mise en place de protocoles adaptés, de mieux cerner les paramètres écologiques qui caractérisent le massif du Jura de l'échelle globale jusqu'à l'échelle stationnelle.

Le chapitre 5 fait la synthèse des résultats des deux outils développés dans les chapitres 3 et 4 (*Figure 5.1* - Phases I et II).

Morlat (1989) et de Vaudour (2003) ont montré que le terroir est vu comme un ensemble d'interactions complexes entre climat, sol, végétation et savoir-faire. Des approches méthodologiques des unités « terroirs » ont été entreprises suivant plusieurs approches : climatique, paysager ou encore pédologique. Un terroir est spécifique à un lieu de production et n'est pas transposable. La connaissance des terroirs permet une spatialisation (zonage et cartographie) puis une thématisation. Dans le massif du Jura, les travaux de Monnet (1996) ont permis la définition des caractéristiques édaphiques dominantes pour individualiser des unités fonctionnelles (Unités Agro-Pédologiques) dans le cadre d'une appellation d'origine contrôlée fromagère. Les UAP considèrent le sol comme étant le milieu de vie des racines et intègrent les critères d'emplacement, d'organisation et fonctionnement du sol. Le massif y a été décrit comme homogène. Cependant, l'exportation de cette démarche est envisageable pour des contextes différents.

L'objectif de ce chapitre est la synthèse de l'ensemble des résultats. Cela permettra d'effectuer la spatialisation des données de vitesse ultrasonique dans les bois du massif jurassien et d'aboutir à un zonage de potentialité sylvicole. Afin de compléter l'analyse spatiale des paramètres écologiques du massif, des cartes thématiques seront réalisées. Le bilan des caractéristiques écologiques devra également permettre de situer le massif du Jura par rapport à d'autres massifs forestiers.

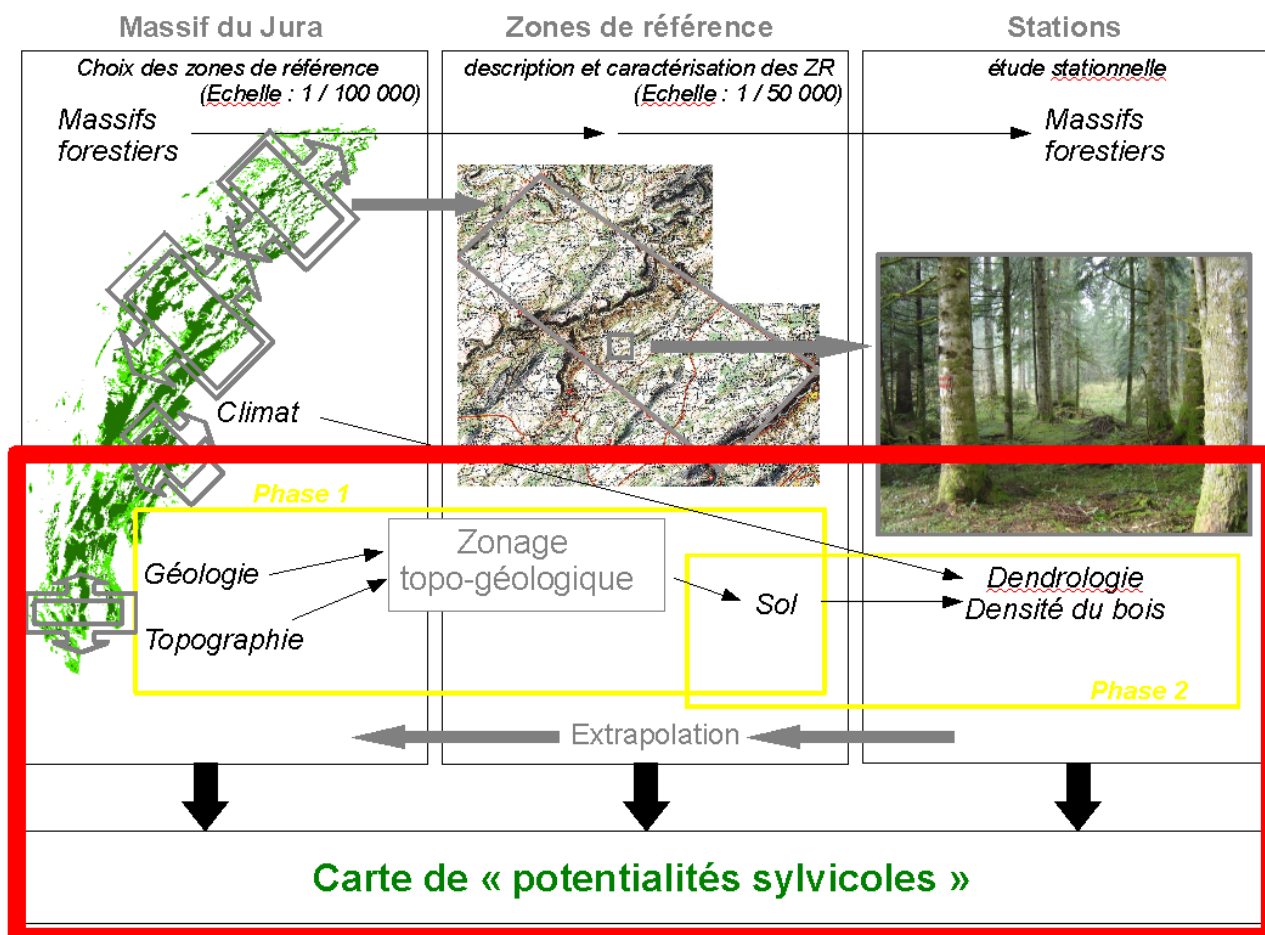


Figure 5.1. Schéma de la démarche générale, mettant l'accent sur la phase de synthèse de l'étude.

2. Matériel et méthodes.

2.1. Définition des unités écologiques.

La délimitation du zonage de potentialité sylvicole est basée sur les résultats des chapitres précédents. Les différents paramètres écologiques ont été spatialisés à l'échelle du massif jurassien.

Les couches d'informations ont été combinées et intégrées à une base de données générale. Les variables retenues sont : l'altitude (5 classes), le climat (10 unités), la géologie (6 unités), la topographie (3 classes), le sol (12 unités) (Figure 2). Au total, il existe 10800 combinaisons possibles pour ces cinq paramètres.

2.2. Spatialisation des données stationnelles et intégration au zonage écologique.

La définition des potentialités sylvicoles est l'une des applications issues de la spatialisation des données stationnelles de vitesses transversales et longitudinales de propagation des ultrasons dans les arbres.

Les paramètres écologiques stationnels ont été inventoriés. La description des unités complexes de sols (UCS) a été détaillée afin de mettre en relation les paramètres de

profondeur du sol, de texture et taux de matière organique (à l'échelle du massif) avec les paramètres stationnels (*cf. chapitres 3 et 4*).

Un ensemble de stations est associé à chaque UCS. Pour chaque UCS, une moyenne est calculée pour les vitesses transversales et longitudinales stationnelles.

Les unités définies pour leur vitesse ultrasonique ont permis de définir la spatialisation des zones de potentiel sylvicole au sein du massif. Il a été nécessaire de séparer les vitesses longitudinales et transversales.

Une valeur de réserve utile a été calculée pour chaque UCS. Trois paramètres ont été pris en compte sur les 27 stations : la profondeur, la texture et l'abondance de matière organique. Après traitement des données stationnelles, à chaque UCS ont été attribuées des valeurs moyenne, médiane, maximale et minimale de la réserve utile.

Une carte de synthèse a permis de spatialiser la superposition des trois couches d'information : climat, vitesse transversale (ou longitudinale) et réserve utile.

2.3. Cartes thématiques.

Le zonage écologique et sa base de données associée ont permis la production de cartes thématiques à l'échelle du massif.

Les paramètres retenus ont été : la profondeur, la texture et l'abondance de matière organique du sol.

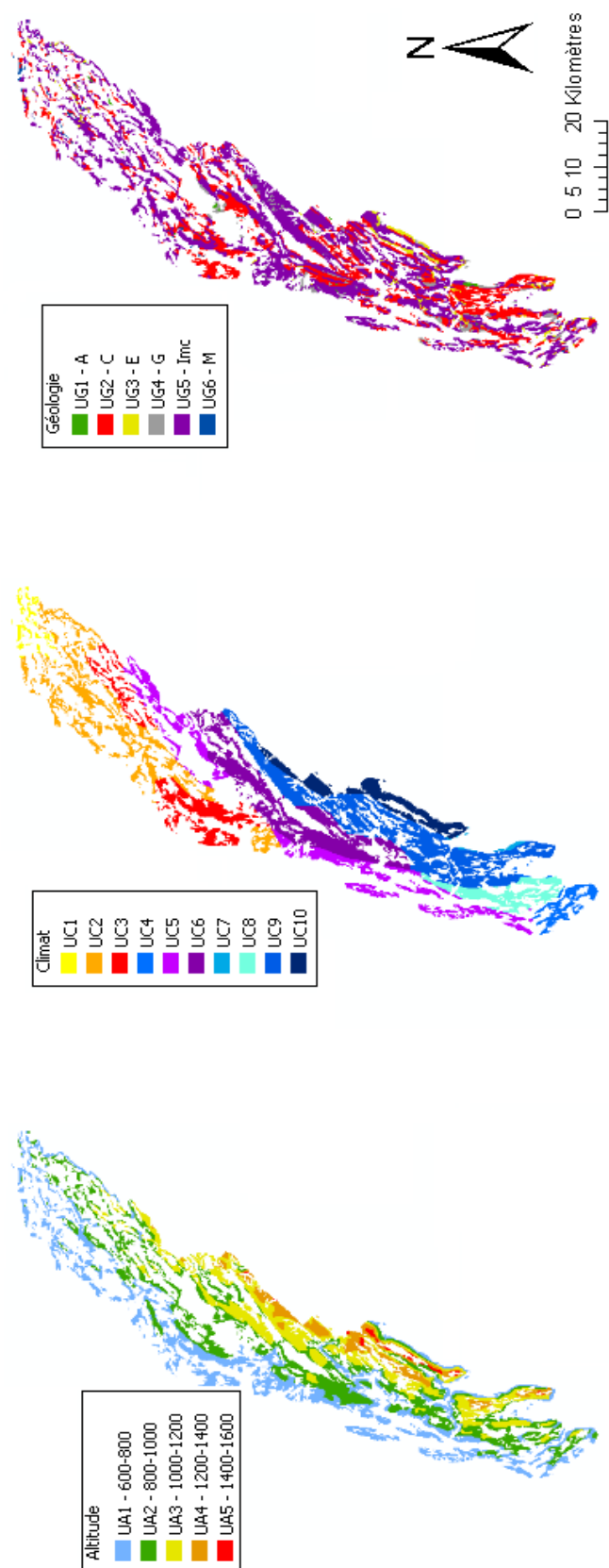


Figure 5.2a. Cartes des unités cartographiques de l'altitude (UA)(a), du climat (UC)(b) et de la géologie (UG)(c).

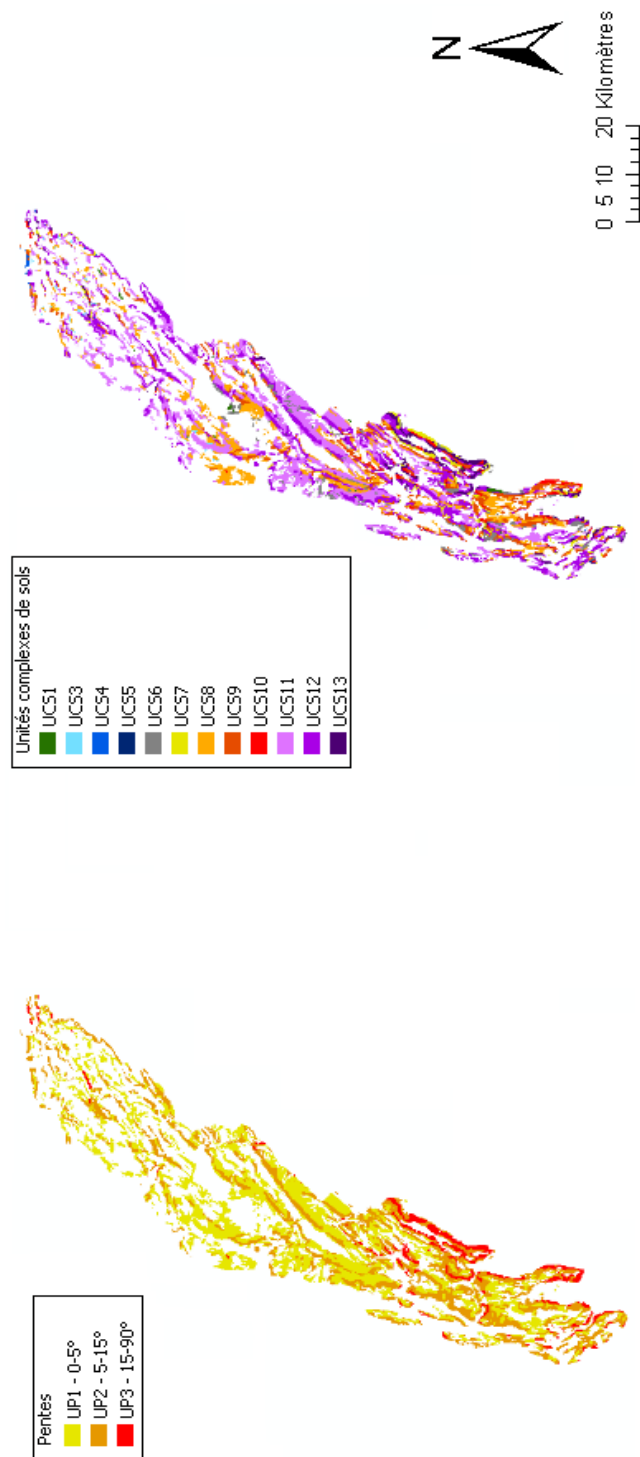


Figure 5.2b. Cartes des unités cartographiques de la pente (UT)(d) et des complexes de sols (UCS)(e).

3. Résultats.

3.1. Spatialisation des données stationnelles.

Après analyse des paramètres stationnels et de l'inventaire des types décrits par la légende des unités complexes de sols, des correspondances ont été mises en évidence :

UCS 1 : station 15.
 UCS 2 : stations 3/7/34.
 UCS 3 : stations 1/2/5/10/12/13/15/32.
 UCS 4 : stations 9/29/32.
 UCS 5 : stations 2/6/19/20.
 UCS 6 : stations 1/10/12/13/32.
 UCS 7 : stations 1/10/12/13/32.
 UCS 8 : stations 1/5/10/12/13.
 UCS 9 : stations 1/10/12/13/14.
 UCS 10 : stations 2/6/19/20.
 UCS 11 : stations 1/10/12/13/24/25.
 UCS 12 : stations 2/3/6/7/19/20/34.
 UCS 13 : station 23.

Tableau 5.1. Classes des vitesses transversales (vtm), longitudinales (vlm) moyennes, réserve utile stationnelle moyenne (ru-st.), réserve utile stationnelle maximale (rua-st) et minimale (rui-st), réserve utile stationnelle rapportée à 1 m² (ru) par unité de complexes de sols (UCS).

UCS	vtm (m.s-1)	vlm (m.s-1)	rum-st (mm)	rua-st (mm)	rui-st (mm)	ru (mm)
1	1700-1800	3700-3800	>10000	>10000	>10000	>4,0
2	2200-2300	3300-3400	3000-4000	4000-5000	2000-3000	1,2-1,6
3	2000-2100	3500-3600	3000-4000	>10000	1000-2000	1,2-1,6
4	1900-2000	3400-3500	4000-5000	4000-5000	3000-4000	1,6-2,0
5	2000-2100	3700-3800	1000-2000	2000-3000	1000-2000	0,4-0,8
6	2100-2200	3300-3400	2000-3000	3000-4000	2000-3000	0,8-1,2
7	2100-2200	3300-3400	2000-3000	3000-4000	2000-3000	0,8-1,2
8	2100-2200	3400-3500	2000-3000	3000-4000	1000-2000	0,8-1,2
9	2100-2200	3400-3500	2000-3000	4000-5000	2000-3000	0,8-1,2
10	2000-2100	3700-3800	1000-2000	1000-2000	2000-3000	0,4-0,8
11	2200-2300	3300-3400	4000-5000	>10000	2000-3000	1,6-2,0
12	2100-2200	3600-3700	2000-3000	4000-5000	1000-2000	0,8-1,2
13	2200-2300	3100-3200	<1000	<1000	<1000	<0,4

D'après le tableau 5.1, la vitesse transversale ne varie pas linéairement avec la vitesse longitudinale (valeurs extrêmes pour UCS1 : vtm = 1800, vlm = 3800 et UCS13 : vtm = 2300, vlm = 3200). Les réserves utiles peuvent varier de 0,4 à 4 millimètres par mètre carré pour les stations les plus profondes. Une majorité de stations se situe dans la classe 0,8-1,2 mm pour la valeur moyenne de RU. Les unités peuvent présenter une amplitude de RU importante (UCS11 : 4,0 mm.m⁻² à 0,8-1,2 mm.m⁻²).

Le massif peut être découpé en quatre zones en tenant compte de la réserve utile (RU) du sol (*Figure 5.3*). Le nord du massif présente une mosaïque d'unités à la RU moyenne ou bonne. La partie centrale présente des RU élevées alors que la partie sud présente en

majorité des unités avec des RU moyennes. La quatrième zone, correspondant aux altitudes importantes, présente des sols avec une RU faible.

Une majorité d'unités présente une moyenne de vitesse transversale au-delà de 2100 m.s^{-1} (*Figure 5.4*). La valeur la plus représentée est 2200 m.s^{-1} . Les valeurs de vitesse les plus importantes sont localisées aux altitudes les plus importantes. Les unités à 2100 m.s^{-1} sont plus représentées dans la partie sud du massif.

La spatialisation des unités de vitesses longitudinales moyennes ne se calque pas sur celle des vitesses transversales moyennes (*Figure 5.5*). La partie centrale du massif et les altitudes les plus élevées présentent les valeurs les moins élevées. Contrairement aux vitesses transversales, ce sont les unités aux valeurs les plus faibles qui sont le plus représentées en surface.

3.2. Zonage de potentialité sylvicole.

Il s'agit de l'intégration des unités climatiques, de réserve utile moyenne et de vitesse moyenne.

Les figures 5.6 et 5.7 permettent la localisation des unités de vitesses ultrasoniques transversales (*Figure 5.6*) ou longitudinales (*Figure 5.7*), associées à la réserve utile du sol et au climat.

À chaque unité climatique, correspond un ensemble important et hétérogène d'unités de réserve utile et de vitesses. Les réserves utiles les plus faibles sont principalement présentes dans les zones climatiques les plus arrosées (UC10). Ces unités ont les vitesses les plus élevées. Les unités présentant des vitesses transversales les plus faibles se caractérisent par des réserves utiles importantes. Les vitesses transversales moyennes sont associées à des réserves utiles moyennes et les vitesses les plus élevées correspondent à des réserves utiles moyennes à fortes.

3.3. Cartes thématiques.

La figure 5.8 confirme que les sols sont majoritairement superficiels au sein du massif. Le relief marqué présente des unités de sols fortement superficielles. Dans la partie centrale du massif, l'unité de sols, la plus superficielle, s'individualise malgré des pentes moins intenses. Le reste de la partie centrale présente une amplitude importante suivant le complexe de sols. Les unités exclusivement profondes, sont rares.

La texture argileuse est dominante pour les sols forestiers du massif (*Figure 5.9*). Une grande majorité de la surface présente des unités avec une variabilité de texture importante, de limoneuse à argileuse. Le tiers sud du massif se distingue par des unités nettement plus argileuses.

La figure 5.10 montre que le taux de matière organique est important dans la partie sud du massif, pour les altitudes les plus élevées. Les zones de pentes fortes présentent également un taux de matière organique importante dans les sols.

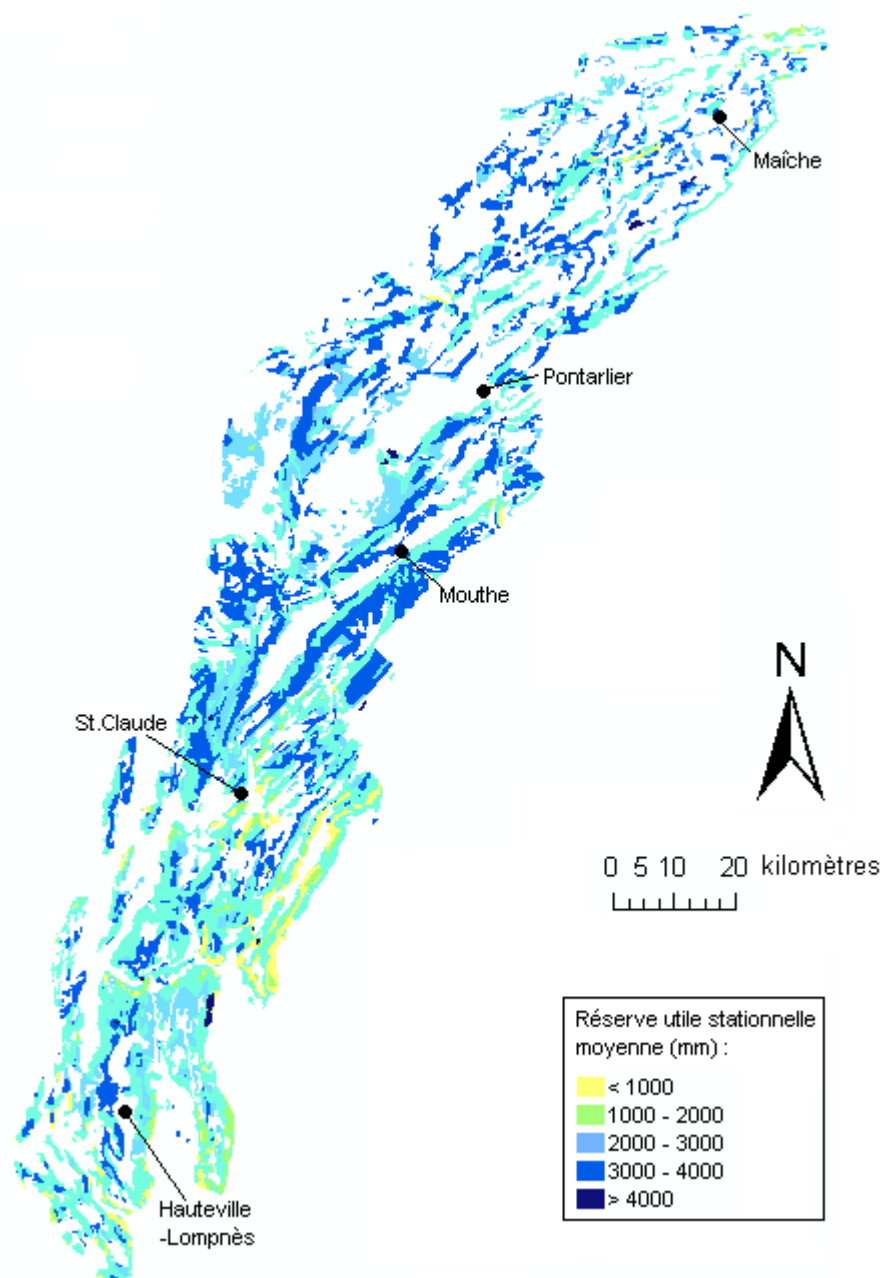


Figure 5.3. Carte des unités de valeur de réserve utile stationnelle. Le découpage des unités est issu des unités complexes de sols.

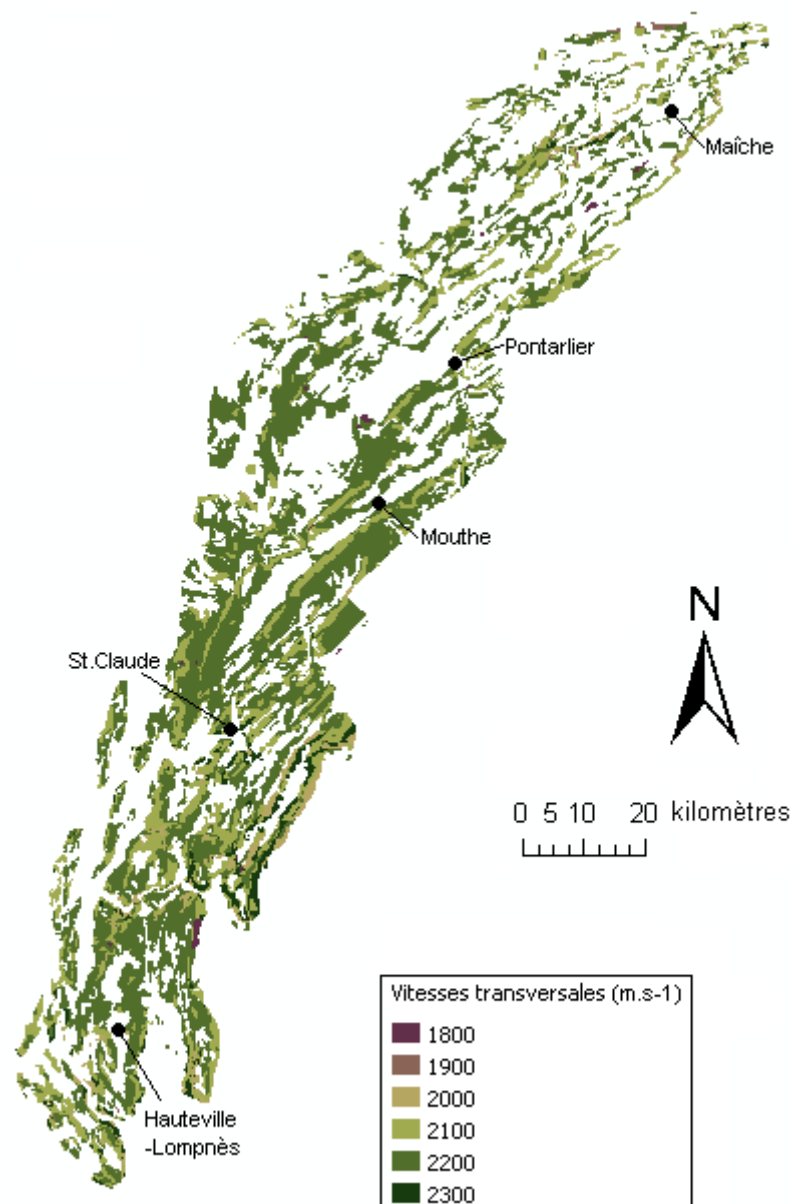


Figure 5.4. Carte des unités de vitesses transversales. Le découpage des unités est issu des unités complexes de sols.

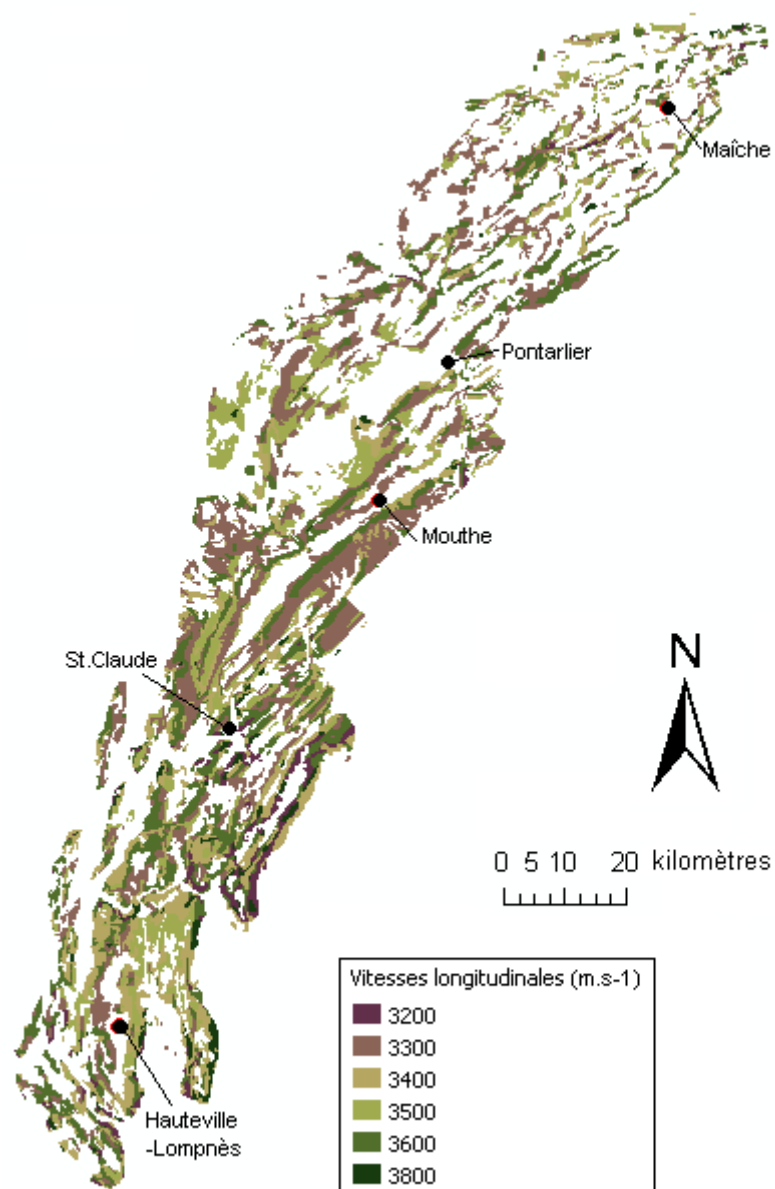


Figure 5.5. Carte des unités de vitesses longitudinales. Le découpage des unités est issu des unités complexes de sols.

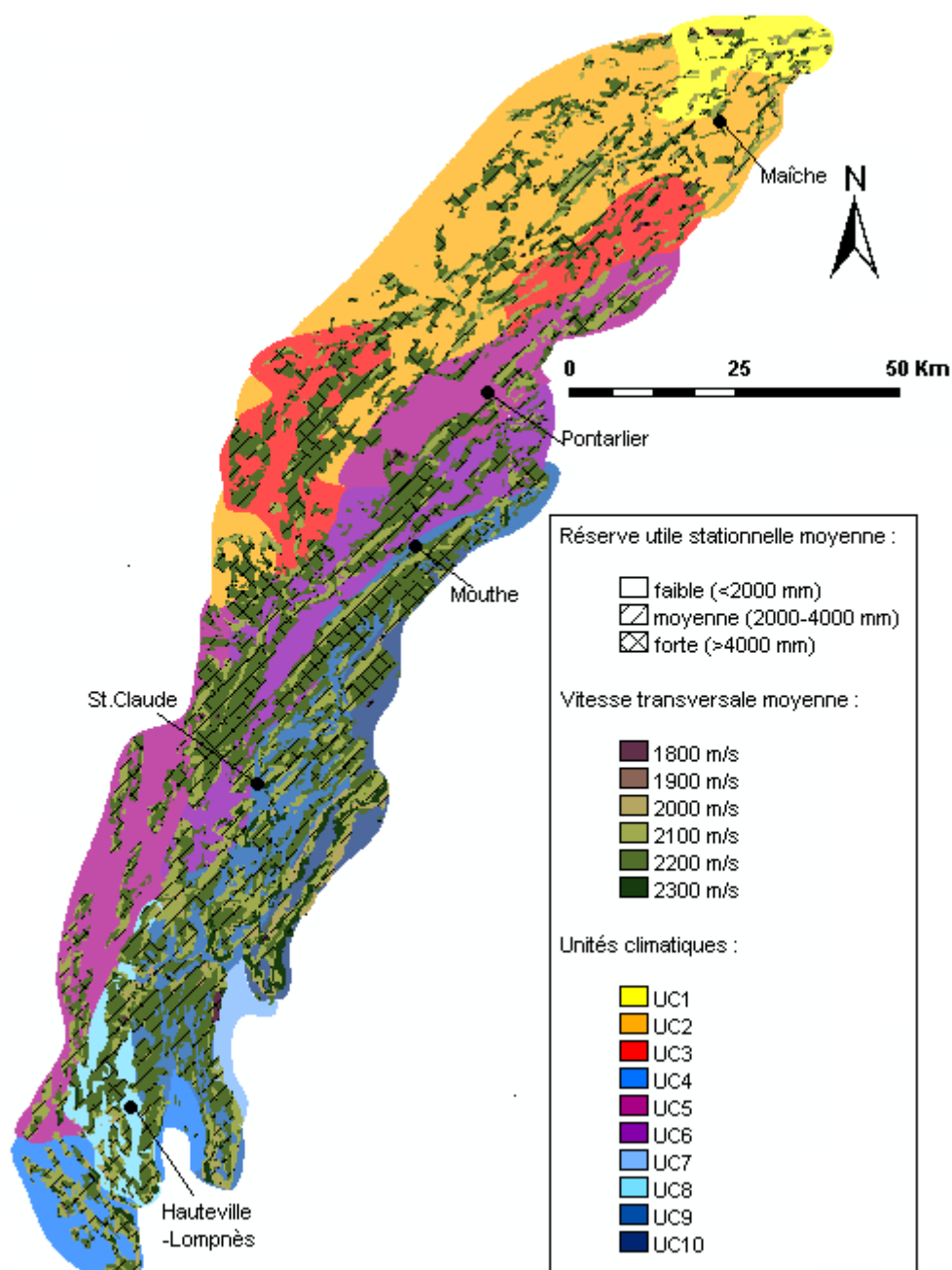


Figure 5.6. Carte de synthèse des unités climatiques, de la réserve utile stationnelle moyenne et de la vitesse transversale moyenne.

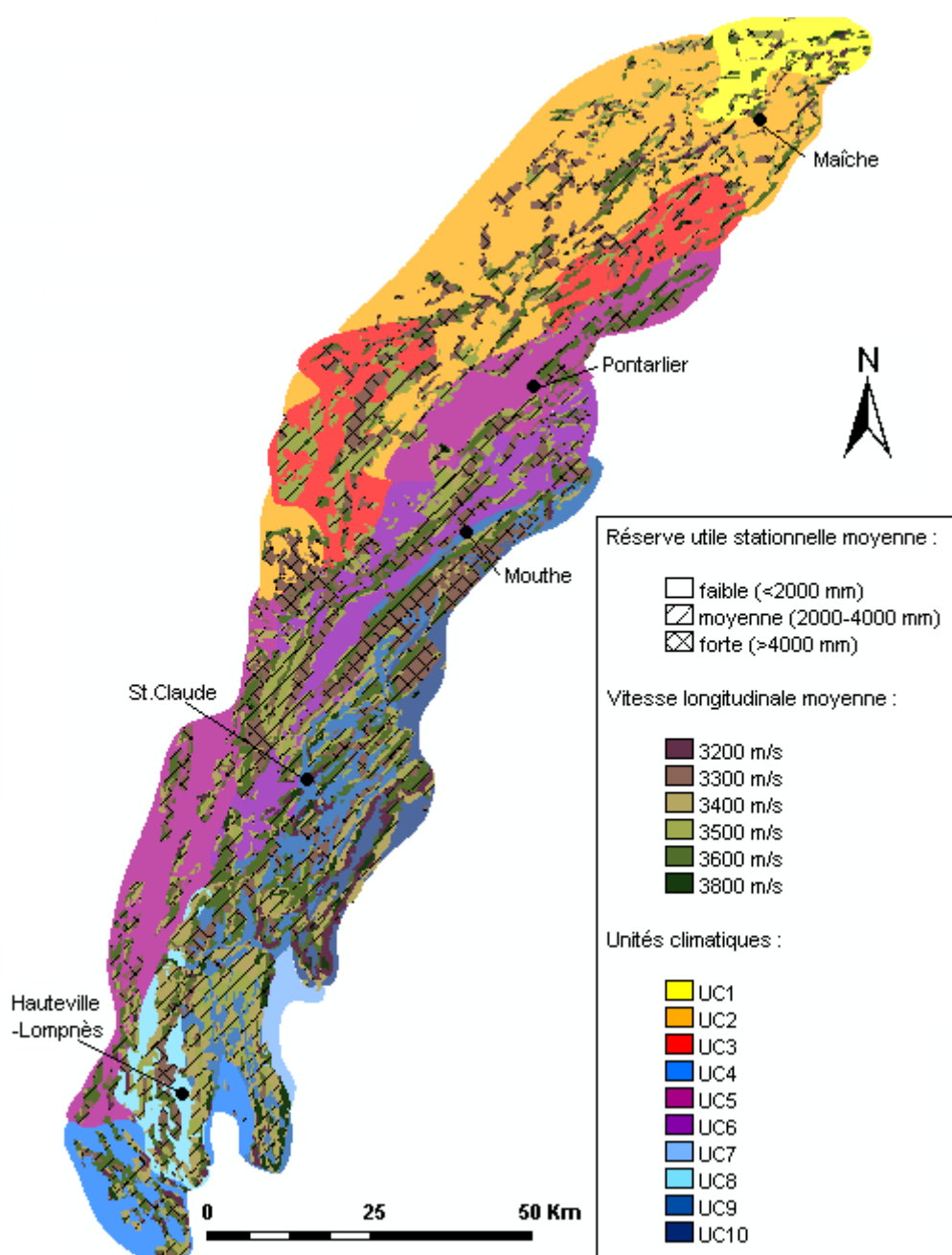


Figure 5.7. Carte de synthèse des unités climatiques, de la réserve utile stationnelle moyenne et de la vitesse longitudinale moyenne.

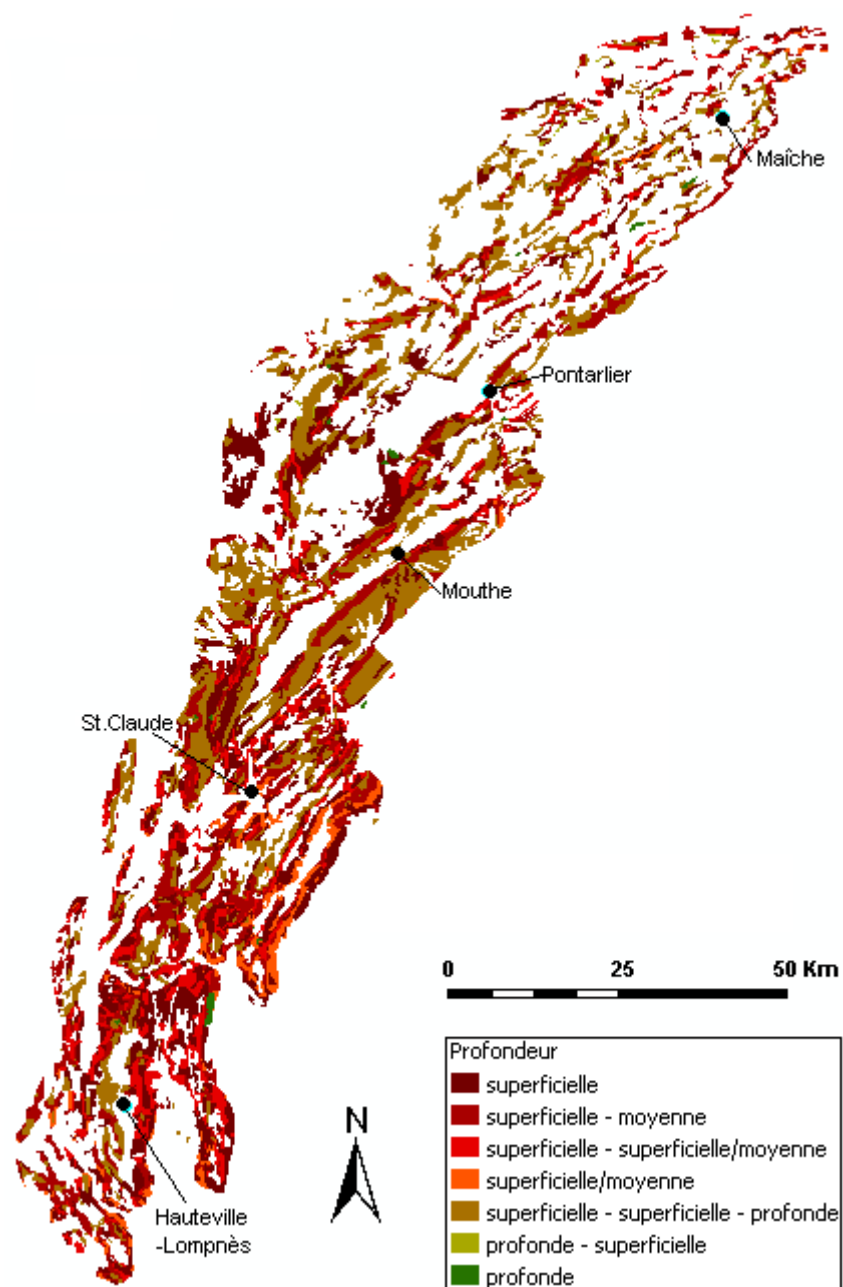


Figure 5.8. Carte de la profondeur du sol (superficielle : 0-30 cm, moyenne : 40-60 cm, profonde : > 70 cm). Le découpage des unités est issu de la synthèse d'unités de terroir sylvicole.

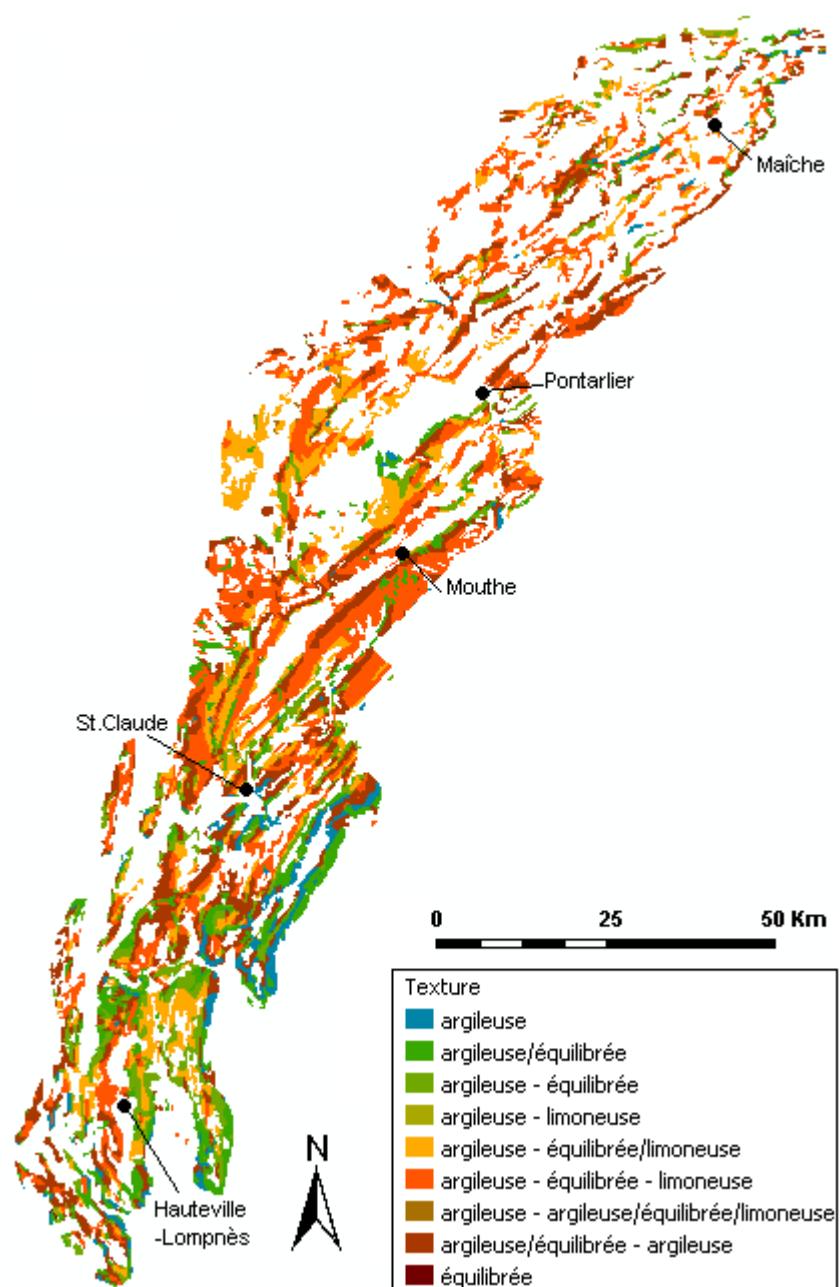


Figure 5.9. Carte de la texture moyenne du sol. Le découpage des unités est issu de la synthèse d'unités de terroir sylvicole.

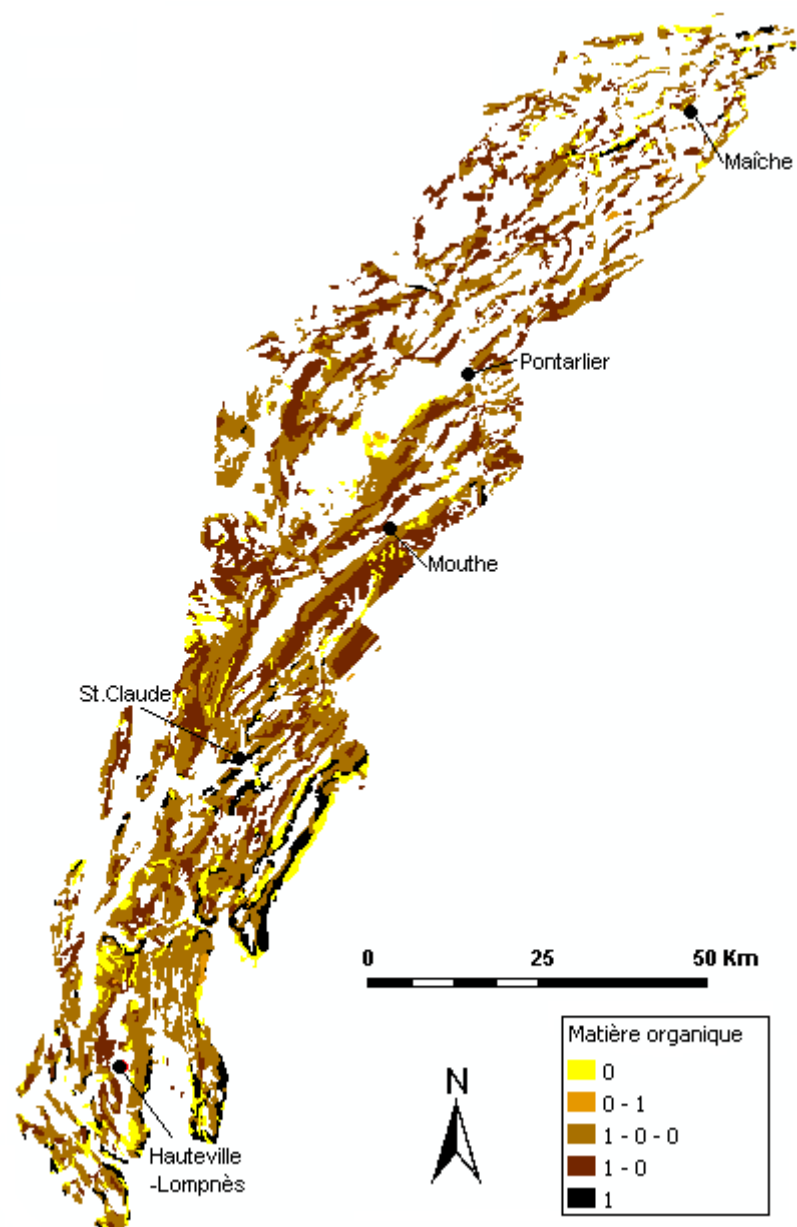


Figure 5.10. Carte des sols humifères (taux de matière organique important). Le découpage des unités est issu de la synthèse d'unités de terroir sylvicole.

4. Discussion.

4.1. Grands traits écologiques des forêts du massif et diversité.

Climat

(cf. chapitre 2)

Le climat est tempéré aux influences continentales et océaniques. L'ensemble des unités mésoclimatiques est parallèle au relief général de la chaîne jurassienne. Les isothermes (10 - 8°C) et les isohyètes (1000 - > 2000 mm) se calquent sur le gradient altitudinal croissant du nord-ouest au sud-est. (*Richard et Hainard, 1981 ; Rameau et Richard, 1990 ; Rameau et al., 1991*)

Géologie

(cf. chapitre 2)

Le contexte géologique est principalement caractérisé par une succession calcaire avec des intercalations marneuses. Les calcaires du Jura peuvent être plus ou moins marneux ce qui entraîne une diversité importante. La variabilité à l'intérieur d'un étage peut être importante et la précision de leur description ne permet pas toujours de trancher vers un faciès plus ou moins calcaire ou marneux. Les étages géologiques concernés par la forêt sont toutefois majoritairement calcaires (*BRGM*).

Altitude et pentes

(cf. chapitre 2)

Le massif du Jura présente un gradient altitudinal du nord-ouest au sud-est de 600 mètres à plus de 1700 mètres. Les altitudes les plus faibles se caractérisent par des plateaux aux pentes nulles à modérées à l'exception des faisceaux plissés les séparant ainsi que les vallées du Dessoubre ou du Doubs. La partie la plus haute, la Haute-Chaîne se caractérise par des pentes modérées à fortes. Dans les cas les plus extrêmes, la pente devient une contrainte majeure pour le développement des arbres, et leur exploitation. D'après sa position géographique et morphogéologique, le massif présente des pentes orientées au nord-ouest et au sud-est (*Girault et al., 2000 et 2001*). Les valeurs d'insolation ne se répartissent pas selon une échelle marquée à l'échelle représentée. Elles sont difficilement interprétables.

Sol

(cf. chapitre 3)

Les sols forestiers du massif du Jura sont principalement peu profonds. La nature et le faciès de la roche a été un facteur important dans la prédiction de cette propriété. Les résultats ont montré que la proportion de sols superficiels augmente avec l'altitude (cf. chapitre 4). L'obstacle majeur se présente sous deux formes : les bancs de calcaires dur ou bien les cailloux calcaires. Dans le second cas, le sol se développe sur une profondeur non négligeable, permettent aux arbres de se développer dans de bonnes conditions (*Drenou, 2006*). L'obstacle « cailloux » peut représenter un frein pour la croissance du système racinaire mais les sapins et les épicéas jurassiens contournent cette contrainte (*Gras, 1994*). Une proportion plus faible de sols présente un volume prospectable important (profondeur supérieure à 1 mètre).

La variabilité de pH des sols forestiers est relativement large (de très acides à basiques). Cela s'explique par la diversité des sols, qui s'étend des tourbes (pH fortement acide) aux sols très caillouteux, sols bruns calcaires (pH supérieur à 7). La présence de sols caillouteux calcaires en plus forte proportion permet de penser que les sols sont majoritairement riches. Les arbres peuvent ainsi prétendre à une alimentation minérale satisfaisante toutefois bridée par la profondeur du sol. A l'inverse, les sols les plus profonds sont par leur nature plus pauvres (sols bruns acides, lessivés) mais le volume important permet de limiter ce déficit.

La texture majoritairement argileuse s'explique par la nature des roches du massif mais la présence de limons en surface n'est pas à négliger. Localement, les dépôts éoliens peuvent être importants.

Une proportion non négligeable de sols forestiers a été qualifié d'« humifères ». Les zones de pentes et d'altitude présentent un taux de matière organique important. Les conditions climatiques, l'intensité de la pente ou la présence d'un calcaire dur entraînent la formation d'un sol peu évolué (sols sur lapiez), un rajeunissement régulier du sol ou un ralentissement du recyclage des débris organiques. En majorité, les sols du massif présentent un bon fonctionnement et un taux de matière organique faible.

La variabilité des unités complexes de sols entraîne une amplitude de réserve utile importante. Les sols du massif ont, en majorité, une réserve utile faible, compensée par les précipitations abondantes et régulières. Ce phénomène est principalement observé pour les altitudes les plus importantes (sud du massif). Le déficit hydrique est peu marqué. A l'inverse, pour les sols ayant une réserve utile plus importante, le phénomène d'hydromorphie est envisageable dans les situations topographiques sensibles à la stagnation de la nappe d'eau.

Densité du bois (cf. chapitre 4)

Nos résultats ont montré que les mesures transversales et longitudinales au Sylvatest Duo ont une amplitude modérée (malgré les différences de plusieurs milliers en $m.s^{-1}$). La mesure longitudinale ne présente qu'un intérêt modéré par rapport à la valeur transversale. En effet, la mesure a été effectuée dans le sens de la longueur du tronc et ne concerne qu'un nombre limité de cernes. Les variations climatiques des dernières années peuvent entraîner un biais dans la mesure destinée à la comparaison inter-stationnelle. En effet, la complexité de l'assemblage des méso-climats pose problème dans l'interprétation des résultats en cas d'année exceptionnelle. La mesure transversale permet d'intégrer la variable climat à l'échelle de la vie de l'arbre. De plus, nos résultats ont montré que les arbres du massif jurassien se situaient au-dessus de la courbe de référence fournie par le bureau CBS-CBT (cf. chapitre 4).

4.2. Originalité du terroir jurassien.

Le terroir jurassien se présente comme un ensemble homogène malgré une variabilité stationnelle qui en fait sa richesse.

Le massif du Jura se définit par une géomorphologie régulière (tabulaire à accidentée) et une gamme d'altitude moyenne (de 600 à 1700 m). Il est soumis à un climat de type

tempéré-montagnard (aux influences continentales et océaniques). Les sols forestiers sont peu profonds, riches (pH élevés) et drainants, sur roches calcaires.

La comparaison avec d'autres massifs forestiers peut permettre de faire ressortir cette originalité. Sans chercher la comparaison en terme de qualité de bois, deux massifs ont été sélectionnés. Les massifs de la Chartreuse et des Vosges ont été comparés suivant leurs paramètres climatiques, géologiques, topographique et pédologiques.

Tableau 5.2. Comparaison entre trois massifs forestiers : les Vosges, le Jura et la Chartreuse.

	Vosges	Jura	Chartreuse
<i>Climat</i>	Quantité de précipitations importante	Quantité de précipitations importante	Quantité de précipitation moyenne
<i>Géologie</i>	Granites / Grès	Calcaires	Calcaires
<i>Topographie</i>	600 – 1200 m Pentes moyennes à fortes	600 – 1500 m Pentes faibles à fortes	900 – 2100 m Pentes moyennes à fortes
<i>Sols</i>	Sols acides / Podzols	Sols brunifiés	Sols calcimagnésiques humifères

Le tableau 5.2 confirme que ces trois massifs présentent une combinaison de paramètres écologiques qui lui est propre. Par conséquent, le terroir jurassien est original !

5. Conclusion.

Ce chapitre de synthèse a permis de combiner les deux phases de l'étude (cartographie des sols et étude stationnelle).

La chaîne du Jura est située à une altitude moyenne (inférieure à 2000 m). Sa géomorphologie est tabulaire à plissée pour les altitudes les plus élevées. Le massif du Jura soumis à un climat tempéré montagnard aux influences océaniques et continentales.

Cette étude a montré que les sols forestiers jurassiens se développent généralement sur calcaire. Ils sont peu profonds car contraints par les bancs massifs ou les cailloux calcaires. Leur texture est à dominante argileuse ce qui en fait des sols riches (pH élevé).

Ce travail original a été entrepris à un degré de précision non utilisé auparavant. Cet ensemble de conditions écologiques est homogène à l'échelle du massif, malgré une variabilité qui peut s'avérer importante à une échelle locale.

La spatialisation des données de vitesses transversale et longitudinale a permis de montrer que les sapins et les épicéas du massif appartiennent à une gamme réduite de valeurs. En moyenne, il s'agit d'arbres d'une grande qualité. Les meilleures densités ont été relevées en altitude sur les sols les plus superficiels.

Pour conclure, la comparaison des paramètres écologiques générales, avec d'autres massifs (Vosges et Chartreuse), montre que le terroir jurassien est tout à fait original.

Conclusion générale

La présente étude avait pour objectif d'approfondir la connaissance des paramètres écologiques du massif jurassien pour expliquer la qualité du bois de résineux ainsi que sa répartition spatiale.

Quatre ensembles de paramètres ont été retenus pour la définition du futur zonage des potentialités sylvicoles. Il s'agit du climat, de la géologie, de la topographie et du sol. A ses thèmes s'ajoutent les données sur les peuplements forestiers de l'arc jurassien. Cependant, une lacune importante a été identifiée pour la caractérisation du terroir sylvicole. La carte des propriétés des sols à l'échelle du massif est inexistante.

Quatre zones de référence décrivant la variabilité de la zone d'étude ont été mises en place, permettant une spatialisation ultérieure à l'échelle du massif.

Les sols ont été décrits le long de transects grâce au sigle morpho-édaphique (*Bruckert, 1989*). Ces données ont été analysées grâce à la mise au point d'un indice synthétique, combinant le volume prospectable et la nutrition hydrique et minérale (CERU). Ainsi, l'analyse de données a permis d'attribuer une probabilité de rencontre d'un type de sol au sein de 13 unités complexes de sols. Ce sont ces unités qui ont été élargies à l'échelle du massif.

Les sols se développent principalement sur des complexes calcaires ou marno-calcaires. Ils se caractérisent par une superficialité marquée et une teneur en argiles relativement importante. Il s'agit de sols riches avec une réserve utile relativement faible, compensée par les précipitations abondantes tout au long de l'année.

Les propriétés stationnelles ont été étudiées sur 27 stations afin d'appréhender la variabilité locale du climat et des propriétés des sols puis de les mettre en relation avec les arbres. Les résultats ont montré qu'il existe une influence significative de la richesse nutritive de la station (pH_{eau}) et de la réserve utile individuelle (en lien avec le volume individuel de sol prospectable) sur la densité du bois de résineux dans le massif du Jura. Les arbres présentent une densité plus importante lorsqu'ils sont localisés sur des stations au pH_{eau} élevé et ayant accès à un volume de sol important pour le développement de leur système racinaire et ayant une disponibilité de l'eau suffisante (les valeurs faibles étant compensées par une bonne quantité de précipitations). De plus, la répartition des stations d'étude a permis de montrer qu'il n'existait pas d'effet de l'altitude. A conditions pédologiques voisines, il n'y aura pas de différence entre deux stations à des altitudes différentes.

Le chapitre de synthèse a permis de confirmer l'originalité du massif du Jura. Les sols forestiers qui se développent sur des calcaires. Ils sont peu profonds car contraints par des bancs massifs ou des éléments grossiers abondants. Leur texture est à dominante argileuse ce qui en fait des sols riches (pH élevé). Cet ensemble de conditions écologiques est homogène à l'échelle du massif, malgré une variabilité qui peut s'avérer importante à une échelle locale.

Cette étude a également confirmé que les sapins et les épicéas du massif étaient des

arbres d'une grande qualité selon une variabilité relativement faible. Les meilleures performances ont été relevées en altitude sur les sols les plus superficiels. De part son contexte (précipitations importantes, roche calcaire, gamme d'altitude moyenne, pentes variées et sols brunifiés), le terroir jurassien est original !

Les résultats de cette étude apportent donc les connaissances qui renforcent l'identité du massif du Jura et sa candidature à la reconnaissance en AOC.

Perspectives

Il serait intéressant d'élargir l'étude à d'autres stations au sein du massif afin d'affiner les résultats déjà analysés.

Les problèmes rencontrés lors du suivi climatique sont un manque qu'il serait intéressant de combler. Il serait nécessaire de mettre en place un suivi climatique afin de noter les différences méso-climatiques entre les différentes stations.

A l'issue de notre travail, les données devront être intégrées à l'étude menée du côté suisse du Massif du Jura. Cette synthèse pourra apporter des informations écologiques objectives au dossier du projet « AOC - Bois du Jura ».

Cette étude pourrait à long terme déboucher sur l'application d'un tel protocole à d'autres régions forestières et à d'autres espèces d'arbres.

Bilan personnel

Cette thèse m'a permis de mettre en place un protocole d'étude complexe en élargissant les recherches aux différents compartiments de l'environnement sylvicole (climat, géologie, sol, arbres...). Les résultats ont été synthétisés et représentés grâce à la cartographie et au changement d'échelle.

Pendant ces cinq années, j'ai pu également développer mon autonomie et mon expérience de travail sur le terrain, dans des conditions pas toujours favorables. Les différentes collaborations qui ont été entreprises pendant cette thèse (laboratoire de Neuchâtel, milieu industriel... etc) ont été bénéfiques grâce à des points de vue parfois différents sur la problématique.

Par ce travail, je suis également fier d'avoir pu aider à la connaissance de la forêt franc-comtoise et à sa promotion.

Références bibliographiques

- Adjanohoun G., Guillot J.L., Lanvin J.D., Cholat R., 1999. Small roundwood grading by nondestructive x-rays and ultrasonic waves methods, p 7. In Fifth World Conference on Timber Engineering, Montreaux, Switzerland, pp. 17-20.
- Agbenin J.O., Tiessen H., 1995. Soil properties and their variations on two contiguous hillslopes in Northeast Brazil. *Catena* 24, pp. 147-161.
- Alteyrac J., 2005. Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.)). Thèse de Doctorat, Université de Laval, 136 p.
- Andreassen K., Solberg S., Tveito O.E., Lystad S.L., 2006. Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway. *Forest Ecology and Management* 222, pp. 211-221.
- Areola O.O., 2002. Photo-interpretation of land facets as a soil mapping technique. *Geoforum* 20, pp. 25-38.
- Arnal H., 1985. Carte pédologique de France à 1/100000 – Montpellier. Carte + notice explicative.
- Aussenac G., 1975. Couvert forestier et facteurs du climat : leurs interactions, conséquences écophysiological chez quelques résineux. Thèse d'Etat, Université de Nancy.
- Bachle H., Walker J., 2006. The influence of temperature on the velocity of sound in green pine wood. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64, pp. 429-430.
- Badeau V., Dambrine E., Walter C., 1999. Propriétés des sols forestiers français : Résultats du premier inventaire systématique. *Etude et Gestion des Sols* 6(3), pp. 165-180.
- Badot P.M., Garrec J.P., 1990. Perturbation hydrique et altération des surfaces dans les aiguilles d'épicéas (*Picea abies* L) du Jura en fonction de leur âge et de l'état de dépérissement des arbres. *Annales des Sciences Forestières* 21, pp. 591-598.
- Badot P.M., Garrec J.P., Millet B., Badot M.J., Mercier J., 1988. Dépérissement et état hydrique des aiguilles chez le *Picea abies*. *Canadian Journal of Botany* 66, pp. 1693-1701.
- Badot P.M., Perrier P., Badot M.J., 1990. Dépérissement, déficit hydrique et variations de croissance radiale chez le *Picea abies*. *Canadian Journal of Botany* 68, pp. 1536-1541.
- Baize D., 1998. A sound reference base for soils. INRA Editions, 322 p.
- Baize D., Girard M.C., 1995. Référentiel Pédologique. AFES/INRA. INRA Editions, 332 p.

- Baize D., Jabiol B., 1995. Guide pour la description des sols. Collection techniques et pratiques, INRA, Paris, 375 p.
- Barham E., 2003. Translating terroir: the global challenge of French AOC labeling. *Journal of Rural Studies* 19, pp. 127-138.
- Beaufils T., 2001. Typologie des stations forestières des Pentes Intermédiaires jurassiennes et du Deuxième Plateau du Jura (Départements du Doubs et du Jura). Société Forestière de Franche-Comté, 288 p.
- Becker M., 1970. Transpiration et comportement vis-à-vis de la sécheresse des jeunes plants forestiers (*Abies alba* Mill., *Picea abies* L. Karsten., *Pinus nigra* Arn. ssp *laricio* Poir., *Pinus strobus* L.). *Ann. Sci. For.* 27(4), 401-420.
- Becker M., 1977. Contribution à l'étude de la transpiration et de l'adaptation à la sécheresse des jeunes plants de résineux. Exemple de 3 sapins du pourtour méditerranéen (*Abies alba*, *A. nordmanniana*, *A. numidica*). *Ann. Sci. For.* 34(2), pp. 137-158.
- Berard L., Beucherie O., Fauvet M., Marchenay P., Monticelli C., 2001. Outils et méthodes en vue d'élaborer la délimitation géographique des indications géographiques protégées (IGP), 47 p.
- Berger A., Peyron J.L., 2005. Les multiples valeurs de la forêt française. Institut français de l'environnement 105, pp. 1-4.
- Bergès L., Nepveu G., Franc A., 2008. Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management* 255 (3-4), pp. 567-579.
- Bergh J., Linder S., Lundmark T., Elfving B., 1999. The effect of water and nutriment availability on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 119, pp. 51-62.
- Bert G.D., 1988. Etude dendroécologique du dépérissement du sapin (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. D.E.A. En Biologie Végétale et Forestière, Centre national de recherches forestières, INRA Champenoux, 63 p. + annexes.
- Bert G.D., 1992. Influence du climat, des facteurs stationnels et de la pollution sur la croissance et l'état sanitaire du Sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Jura. Etude phytoécologique et dendrochronologique. Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1. 199 p.
- Bert G.D., 1993. Impact of ecological factors, climatic stresses, and pollution on growth and health of silver (*Abies alba* Mill.) in the Jura Mountains: an ecological and dendrochronological study. *Acta Oecologica* 14(2), pp. 229-246."
- Blanchard E., Burac M., 2003. Révision de la délimitation de l'aire du rhum AOC Martinique, 25 p.

Blondé J.L., 1989. Influence du régime hydrique induit par la fissuration des roches sur l'humification et l'organisation des sols en milieu calcaire. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 142 p.

Blouin D., Beaulieu J., Daoust G., Poliquin J., 1994. Wood quality of norway spruce grown in plantations in Quebec. *Wood and Fiber Science* 26(3), pp. 342-353.

Bonvicini M.P., 1983. Etude stationnelle de la régénération du sapin (*Abies alba*) à l'étage montagnard du Jura. D.E.A. De Biologie et Physiologie Végétale, Université de Franche-Comté, 31 p.

Bourgeois M., Mathieu D., 1979. Contribution à l'étude du climat Comtois. Franche-Comté Météo, C.R.D.P., Besançon.

Bruckert S., 1989. Désignation et classement des sols agricoles d'après des critères de situation et d'organisation : application aux terres franc-comtoises du domaine climatique tempéré semi-continentale. *Agronomie* 9(4), pp. 353-361.

Bruckert S., Gaiffe M., 1980. Pédogenèse en pays calcaire glaciaire ou karstique. Analyse des facteurs de formation et de distribution des sols en pays calcaire ou karstique. Plaine de Frasne-Bonnevaux et montagne du Laveron-Jura central. *Ann.Sci.Univ.Fr.-Comté, Besançon, Biol. Vég.* 1(4), pp. 19-67.

Bruckert S., Gaiffe M., 1985. Les sols de Franche-Comté. Centre Universitaire d'Etudes Régionales, Université de Franche-Comté, 142 p.

Bruckert S., Gaiffe M., 1990. Les systèmes de sub-surface sols-roches, modèles de pédogenèses. Exemples des domaines karstique et non-karstique de Franche-Comté. *Science du Sol* 28(4), pp. 319-332.

Brunelle J., Thomson K., Gilbert P., 1989. Contribution de la télédétection à la cartographie du milieu forestier (dans « Télédétection en francophonie »). Ed. AUPELF-UREF, pp. 93-95.

Brus D.J., de Gruijter J.J., 1997. Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil. *Geoderma* 80(1-2), pp. 1-44.

Buffet M., Girault D., 1989. Station forestière, production et qualité des bois : éléments méthodologiques. CEMAGREF, 254 p.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1957. Mouthe – Carte géologique 1/50 000 n° 583. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1963. Ornans – Carte géologique 1/50 000 n° 530. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1965a. Champagnole – Carte géologique 1/50 000 n° 582. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1965b. Vercel – Carte géologique 1/50 000 n° 503. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1967. Salins-les-Bains – Carte géologique 1/50 000 n° 556. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1969. Morez – Carte géologique 1/50 000 n° 605. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1970a. Moirans-en-Montagne – Carte géologique 1/50 000 n° 627. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1970b. Rumilly – Carte géologique 1/50 000 n° 701. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1972a. Saint-Claude – Carte géologique 1/50 000 n° 628. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1972b. Seyssel – Carte géologique 1/50 000 n° 677. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1973. Montbéliard – Carte géologique 1/50 000 n° 474. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1975. Quingey – Carte géologique 1/50 000 n° 529. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1976. La-Tour-du-Pin – Carte géologique 1/50 000 n° 724. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1979. Damprichard – Carte géologique 1/50 000 n° 505. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1982. Saint-Rambert-en-Bugey – Carte géologique 1/50 000 n° 676. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1983. Orgelet – Carte géologique 1/50 000 n° 604. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1985. Delle – Carte géologique 1/50 000 n° 475. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1988a. Ambérieu-en-Bugey – Carte géologique 1/50 000 n° 675. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1988b. Bourg-en-Bresse – Carte géologique 1/50 000 n° 651. BRGM Editions.

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1990. Belley – Carte géologique 1/50 000 n° 700. BRGM Editions.

- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1993. Lons-le-Saunier – Carte géologique 1/50 000 n° 581. BRGM Editions.
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 1997. Saint-Julien – Carte géologique 1/50 000 n° 653. BRGM Editions."
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 2004. Nantua – Carte géologique 1/50 000 n° 652. BRGM Editions.
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 2006. Pontarlier – Carte géologique 1/50 000 n° 557. BRGM Editions.
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 2008a. Maîche – Carte géologique 1/50 000 n° 504. BRGM Editions.
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), 2008b. Morteau – Carte géologique 1/50 000 n° 531. BRGM Editions.
- Burnand J., Burger T., Stocker R., Danner E., Kaufmann G., Lüscher P., 1998. Stations forestières du Canton du Jura et du Jura bernois (Vol.1: clé de détermination ; vol.2 : commentaires).
- Bütler R., Patty L., Le Bayon RC., Guenat C., Schlaepfer R., 2007. Log decay of *Picea abies* in the Swiss Jura Mountains of central Europe. *Forest Ecology and Management* 242, pp. 791-799.
- Bütler R., Schlaepfer R., 2004. Spruce snag quantification by coupling colour infrared aerial photos and a GIS. *Forest Ecology and Management* 195, pp. 325-339.
- Carey V.A., Archer E., Saayman D., 2002. Natural terroir units: what are they? How can they help the wine farmer. Wynboer.
- Carré F., 2002. Cartogénèse des sols et changement d'échelle. Application dans la région de La Rochelle sur une base de données pédologiques de plusieurs milliers d'observations. Thèse de Doctorat, Institut Agronomique Paris-Grignon, 399 p.
- Carré F., Girard M.C., 2002. Quantitative mapping of soil types based on regression kriging of taxonomic distances with landform and land cover attributes. *Geoderma* 110, pp. 241-263.
- Chauhan S.S., Walker J.C.F., 2006. Variations in acoustic velocity and density with age, and their interrelationships in radiata pine. *Forest Ecology and Management* 229, pp. 388-394.
- Chauve P., 1975. Guide géologique régional du Jura. Editions Masson, 216 p.
- Chrétien J., 1976. Carte pédologique de France à 1/100000 – Dijon. Carte + notice explicative.

- Claessens H., 2005. Les cahiers forestiers de Gembloux – Itinéraires sylvicoles pour la production de frêne de qualité. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, 14 p.
- Concepts Bois Structure, 2004. Etude qualitative par ultrasons et caractérisation de la valeur mécanique des résineux de Franche-Comté, 46 p.
- Conradie K., 2002. Soil type may influence wine style: Cabernet Sauvignon from Durbanville and Robertson. Wynboer.
- Copenheaver C.A., Abrams M.D., 2003. Dendroecology in young stands: case studies from jack pine in northern lower Michigan. *Forest Ecology and Management* 182(1-3), pp. 247-257.
- Corona P., Scotti R., Tarchiani N., 1998. Relationship between environmental factors and site index in Douglas-fir plantations in central Italy. *Forest Ecology and Management* 110, pp. 195-207.
- Court-Picon M., Gadbin-Henry C., Guibal F., Roux M., 2004. Dendrometry and morphometry of *Pinus pinea* L. in Lower Provence (France): adaptability and variability of provenances. *Forest Ecology and Management* 194, pp. 319-333.
- Curt T., Dole S., Marmeys G., 1996. Alimentation en eau et production forestière. *Etude et Gestion des Sols* 3(2), pp. 81-96.
- Curt T., Lucot E., Bouchaud M., 2001. Douglas-fir biomass and rooting profile in relation to soils in a mid-elevation area (Beaujolais Mounts, France). *Plant and Soil* 233, pp. 109-125.
- Curt T., Marsteau C., 1997. Systèmes géopédologiques et production forestière sur substratum carbonaté et gréseux en zone méditerranéenne – L'exemple des chênes vert et pubescent dans les garrigues du Gard. *Etude et Gestion des Sols* 4(4), pp. 247-263.
- Cutter B.E., Lowell K.E., Dwyer J.P., 1991. Thinning effects on diameter growth in black and scarlet oak as shown by tree ring analyses. *Forest Ecology and Management* 43(1-2), pp. 1-13.
- Desplanque C., Rolland C., Michalet R., 1998. Dendroécologie comparée du sapin blanc (*Abies alba*) et de l'épicéa commun (*Picea abies*) dans une vallée alpine de France. *Canadian Journal of Forest Research* 28, pp. 737-748.
- Devine W.D., Harrington C.A., 2007. Influence of harvest residues and vegetation on microsite soil and air temperatures in a young conifer plantation. *Agricultural and Forest Meteorology* 145, pp. 125-138.
- Dobos E., Micheli E., Baumgardner M.F., Biehl L., Helt T., 2000. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. *Forest Ecology and Management* 43(1-2), pp. 1-13.
- Dobos E., Montanarella L., Nègre T., Micheli E., 2001. A regional scale soil mapping approach using integrated AVHRR and DEM data. *JAG* 3(1), pp. 30-42.

Dobremez JF., Camaret S., Bourgot L., Ulrich E., Brêthes A., Coquillard P., Dume G., Dupouey JL., Forgeard F., Gauberville C., Gueugnot J., Picard JF., Savoie JM., Schmitt A., Timbal J., Touffet J., Tremollières M., 1997. RENECOFOR - Inventaire et interprétation de la composition floristique de 101 peuplements du réseau (Campagne 1994/95). Office National des Forêts, Département des Recherches et Techniques, 513 p.

Drapier J., 1980. Influence de l'humus et de la végétation sur la régénération du sapin. Hypothèse allélopathique. DEA, Université de Nancy I.

Drapier J., 1983. Les difficultés de régénération des sapinières vosgiennes. Importance de l'humus et rôle de l'allélopathie. Thèse, Université de Nancy I, S.T.M.C.M.

Drénou C., 2006. Les racines, face cachée des arbres. Ed IDF, 335 p.

Duchaufour P., 1995. Pédologie – Sol, végétation, environnement. Masson, 324 p.

Duchaufour P., 2001. Introduction à la science du sol – Sol, végétation, environnement. Dunod, 331 p.

Dupouey JL., Thimonier A., Behr P., 1997. Variations de la densité des sols des hêtraies du nord-est de la France en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. *Etude et Gestion des Sols* 4(1), pp. 43-52.

Eriksson C.P., Holmgren P., 1996. Estimating stone and boulder content in forest soils – evaluating the potential of surface penetration methods. *Catena* 28, pp. 121-134.

Fierz S., Montbaron M., 1999. Morphogenesis of the Franches-Montagnes (Swiss Jura Mountains). *Eclogae Geologicae Helvetiae* 92(2), pp. 199-210.

Food and Agriculture Organisation (FAO), 1998. World Reference Base for Soil resources. United Nations, 98 p.

Frey P.J., Borouchaki H., 2002. Simplification des cartes géographiques par minimisation de la déformation locale. *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. I* 334, pp. 227–232.

Friedli B., Tobias S., Fritsch M., 1998. Quality assessment of restored soils: combination of classical soil science methods with ground penetrating radar and near infrared aerial photography? *Soil & Tillage Research* 46, pp. 103-115.

Fritzsche F., Zech W., Guggenberger G., 2007. Soils of the Main Ethiopian Rift Valley escarpment: A transect study. *Catena* 70, pp. 209–219.

Gaddas F., 2001. Proposition d'une méthode de cartographie des pédopaysages – Application à « la moyenne vallée du Rhone ». Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 218 p.

Gaiffe M., 1972. Contribution à l'étude écologique des hêtraies du Doubs. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 80 p.

- Garten Jr. C.T., Kang S., Brice D.J., Schadt C.W., Zhou J., 2007. Variability in soil properties at different spatial scales (1 m–1 km) in a deciduous forest ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry* 39(10), pp. 2621-2627.
- Gartner B.L., Aloni R., Funada R., Lichtfuss-Gautier A.N., Roig F.A., 2002. Clues for dendrochronology from studies of wood structure and function. *Dendrochronologia* 20(1-2), pp. 53-61.
- Girard M.C., Walter C., Rémy JC., Berthelin J., Morel JL., 2005. *Sol et Environnement*. Dunod, 816 p.
- Girault I., François E., Vernay, JL., Clément F., Juillard-Ferreux F., Gauthier F., Lienhardt D., Michelucci S., Sauvonnet S., Wenger-Bidoyen C., Suratteau D., Rollet A., Deyparraquirre N., Brossard T., Joly D., Cour P., Tourneux FP., 2001. *Atlas des paysages de Franche-Comté – Jura*. NEO Editions, 333 p.
- Girault I., François E., Vernay, JL., Gauthier F., Lienhardt D., Wenger-Bidoyen C., Suratteau D., Rollet A., Deyparraquirre N., Brossard T., Joly D., Cour P., Tourneux FP., 2000. *Atlas des paysages de Franche-Comté – Doubs*. NEO Editions, 381 p.
- Gong P., Pu R., Yu B., 1997. Conifer Species Recognition: An Exploratory Analysis of In Situ Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment* 62(2), pp. 189-200.
- Gras R., 1994. *Sols caillouteux et production végétale*. INRA Editions, 179 p.
- Gresser P., Robert A., Royer C., Vion-Delphin F., 1990. *Les hommes et la forêt en Franche-Comté* Editions Bonneton, 319 p.
- Groëll F., Bruckert S., 1993. Définition de l'environnement géochimique des sols calcimagnésiques et brunifiés sur roches calcaires. Application au massif jurassien. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre* 317(1), pp. 93-96.
- Guilley E., Herve JC., Nepveu G., 2004. The influence of site quality, silviculture and region on wood density mixed model in *Quercus petraea* Liebl. *Forest Ecology and Management* 189, pp. 111-121.
- Guillot JL., Lanvin JD., Sandoz JL., 1996. Spruce and fir grading with neural networks by sylvatest measurements. *Sciences et industries du bois – 4e Colloque*, Nancy, France, pp. 377-384.
- Guiot J., 1984. Deux methodes d'utilisation de l'épaisseur des cernes ligneux pour la reconstitution de parametres climatiques anciens, l'exemple de leur application dans le domaine alpin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 45(3-4), pp. 347-368.
- Havliceck E., Gobat JM., 1996. Les apports éoliens dans les sols du Jura – Etat des connaissances et nouvelles données en pâturages boisées. *Etude et Gestion des Sols* 3(3), pp. 167-178.

Hengl T., Heuvelink G.B.M., Stein A., 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma* 120, pp. 75-93.

Hupy C.M., Schaetzl R.J., Messina J.P., Hupy J.P., Delamater P., Enander H., Hughey B.D., Boehm R., Mitroka M.J., Fashoway M.T., 2004. Modeling the complexity of different, recently deglaciated soil landscapes as a function of map scale. *Geoderma* 123, pp. 115-130.

Ibanez J.J., De-Alba S., Bermudez F.F., Gracia-Alvarez A., 1995. Pedodiversity : concepts and mesures. *Catena* 24, pp. 215-232.

ifn.fr

Inventaire Forestier National, 2008. Carte du pH de surface des sols forestiers français estimé par le caractère bioindicateur de la flore spontanée. Version 1. <http://www.ifn.fr/spip/spip.php?article552>

Jaakkola T., Mäkinen H., Saranpää P., 2006. Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation. *Forest Ecology and Management* 237, pp. 513-521.

Jouaffre D., Bruckert S., Williams A.F., Herbillon A.J., Kubler B., 1991. Rubéfaction post-wurmienne en climat montagnard humide jurassien. Rôle du pédoclimat et actualité du processus. *Geoderma* 50(3), pp. 239-257.

Kern Z., Popa I., 2007. Climate–growth relationship of tree species from a mixed stand of Apuseni Mts., Romania. *Dendrochronologia* 24, pp. 109–115.

King D., Saby N., 2001. Analyse de la représentativité des cartes pédologiques au 1/100000 pour la connaissance des sols du territoire français. *Etude et Gestion des Sols* 8(4), pp. 247-267.

Knoepp J.D., Coleman D.C., Crossley Jr. D.A., Clark J.S., 2000. Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. *Forest Ecology and Management* 138, pp. 357-368.

Korkalainen, T., Lauren, A., 2006. Using phytogeomorphology, cartography and GIS to explain forest site productivity expressed as tree height in southern and central Finland. *Geomorphology* 74, pp. 271-284.

Lagacherie P., Cazemier D.R., Martin-Clouaire R., Wassenaar T., 2000. A spatial approach using imprecise soil data for modelling crop yields over vast areas. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 81, pp. 5-16.

Lagacherie P., Legros J.P., Burrough P.A., 1995. A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma* 65, pp. 283-301.

Lagacherie P., Robbez-Masson J.M., Nguyen-The N., Barthès J.P., 2001. Mapping of reference area representativity using a mathematical soilscape distance. *Geoderma* 101, pp. 105-118.

Lagacherie P., Voltz M., 2000. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. *Geoderma* 97, pp. 187-208.

Lark R.M., Bolam H.C., 1997. Uncertainty in prediction and interpretation of spatially variable data on soils. *Geoderma* 77, pp. 263-282.

Lathrop (Jr). R.G., Aber J.D., Bognar J.A., 1995. Spatial variability of digital soil maps and its impact on regional ecosystem modeling. *Ecological Modelling* 82, pp. 1-10.

Laurent F., Rossignol J.P., 2003. Cartographie des propriétés hydriques des sols à partir de la lithologie et des pentes. Application au bassin versant de la Moine (Maine-et-Loire, France). *Etude et Gestion des Sols* 10(3), pp. 155-172.

Laurent F., Rossignol J.P., 2004. Stabilité du modèle agro-hydrologique à la cartographie des sols : Test d'une méthode basée sur l'indice topographique et la lithologie. *Etude et Gestion des Sols* 11(3), pp. 199-218.

Le Bissonnais Y., Dubreuil N., Daroussin J., Gorce M., 2004. Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. Exemple du département de l'Aisne. *Etude et Gestion des Sols*, 11(3), pp. 307-321.

Le Tacon F., 1976. La présence de calcaire dans le sol influence sur le comportement de l'épicéa commun (*Picea abies* Link.) et du pin noir d'Autriche (*Pinus nigra nigricans* Host.). Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 214 p.

Legros J.P., 1996. Cartographie des sols, de l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses Polytechniques Romandes, 321 p.

Legros J.P., Kolbl O., Falipou P., 1996. Délimitation d'unités de paysage sur des photographies aériennes – Eléments de réflexion pour la définition d'une méthode de tracé. *Etude et Gestion des Sols* 3(2), pp. 113-124.

Loukili M., Block L., Engels P., Mathieu L., 2000. Approche géomorpho-pédologique et système d'information géographique (SIG) pour la gestion des terres au Maroc. *Etude et Gestion des Sols* 7(1), pp. 37-52.

Lucot E., 1990. Première approche relative à l'interaction enracinement-pierrosité (*Abies alba*, *Quercus petraea* et *Quercus robur*) – Proposition d'un indice d'obstacle appliqué aux sols forestiers jurassiens. D.E.A. De Pédologie, Université de Franche-Comté, 57 p.

Lucot E., Gaiffe M., 1994. Cartographie de massifs forestiers témoins sur substrats calcaires du Nord Est de la France. Intégration de l'indice de pierrosité dans la caractérisation des sols.

Lucot E., Gaiffe M., 1995. Méthode pratique de description des sols forestiers caillouteux sur substrat calcaire. *Etude et Gestion des Sols* 2(2), pp. 91-104.

Lucot F., 1996. Les rôles du climat et la concurrence dans la croissance radiale des espèces tempérées. Rapport bibliographique. D.E.A. Analyses de Modélisation des Systèmes Biologiques. Université Claude Bernard – Lyon I, 32 p.

Maby J., 2003. Les enjeux paysagers viticoles. Actes du symposium international Terroirs et zonage vitivinicole, Office International de la Vigne et du vin, Avignon juin 2002, pp. 823-831.

Maghuly F., Pinsker W., Praznik W., Fluch S., 2006. Genetic diversity in managed subpopulations of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecology and Management* 222, pp. 266–271.

Mäkinen H., Jaakkola T., Piispanen R., Saranpää P., 2007. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 241, pp. 175-188.

Manetti M.C., Cutini A., 2006. Tree-ring growth of fir (*Abies alba* Mill.) in two stands under different silvicultural systems in central Italy. *Dendrochronologia* 23, pp. 145-150.

Marcos J.A., Marcos E., Taboada A., Tarrega R., 2007. Comparison of community structure and soil characteristics in different aged *Pinus sylvestris* plantations and a natural pine forest. *Forest Ecology and Management* 247 (1-3), pp. 35-42.

Martin C., 2003. Une AOC pour les résineux du massif du Jura : La reconnaissance et la protection d'un produit à forte notoriété. Mémoire de DESS Connaissance et Gestion des Terroirs, Université de Franche-Comté, 69 p.

Martinelli M., 2004. Climate from dendrochronology: latest developments and results. *Global and Planetary Change* 40, pp. 129-139.

Martinez JM., 2000. Estimation de la biomasse forestière et caractérisation de la structure verticale des peuplements de conifères par radar VHF et radar sondeurs aéroportés. Thèse de Doctorat, INGREF.

Mathieu D., 1976. Le climat de Franche-Comté. Atlas de Franche-Comté, numéro 6. Institut de Géographie, Besançon.

Mathieu D., 1978. Variations annuelles des précipitations. Cahiers de l'Atlas de Franche-Comté 1.2. Institut de Géographie, Besançon.

Mendonca Santo M.L., Guenat C., Bouzelboudjen M., Golay F., 2000. Three-dimensional GIS cartography applied to the study of the spatial variation of soil horizons in a Swiss floodplain. *Geoderma* 97, pp. 351-366.

meteofrance.com

Michalet R., 1982. Influence du climat général sur l'évolution des sols à l'étage sub-alpin dans le jura. Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1, 103 p.

- Misson L., Nicault A., Guiot J., 2003. Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forest Ecology and Management* 183, pp. 47-60.
- Misson L., Vincke C., Devillez F., 2003. Frequency responses of radial growth series after different thinning intensities in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands. *Forest Ecology and Management* 177, pp. 51-63.
- Monnet J.C., 1996. Caractérisation fonctionnelle d'unités cartographiques prairiales dans le massif du Jura - Application à la définition des terroirs du comté. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 140 p.
- Morlat R., 1989. Le terroir viticole: contribution, à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de la moyenne vallée de la Loire. Thèse doct. Etat, Bordeaux II, 289 p. + annexes.
- Okland T., Rydgren K., Okland R.H., Storaunet K.O., Rolstad J., 2003. Variation in environmental conditions, understorey species number, abundance and composition among natural and managed *Picea abies* forest stands. *Forest Ecology and Management* 177, pp. 17-37.
- Oudinot I., 1984. Les sols du pied du Jura suisse : typologie, cartographie et caractéristiques de base. D.E.A de Biologie et Physiologie Végétale, option Pédologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 43 p.
- Pansu M., Gautheyrou J., 2003. L'analyse du sol - Minéralogique, Organique Et Minérale Springer Verlag France, 993 p.
- Park D., Spiecker H., 2005. Variations in the tree-ring structure of Norway spruce (*Picea abies*) under contrasting climates. *Dendrochronologia* 23, pp. 93-104.
- Payn T.W., Hill R.B., Höck B.K., Skinner M.F., Thorn A.J., Rijkse W.C., 1999. Potential for the use of GIS and spatial analysis techniques as tools for monitoring changes in forest productivity and nutrition, a New Zealand example. *Forest Ecology and Management* 122, pp. 187-196.
- Perret S., Stoffel M., Kienholz H., 2006. Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps - A dendrogeomorphological case study. *Geomorphology* 74, pp. 219-231.
- Phillips J.D., 2001. Divergent evolution and the spatial structure of soil landscape variability. *Catena* 43, pp. 101-113.
- Picard N., Ben-Hen A., 2002. La corrélation spatiale entre la surface terrière des arbres et leur accroissement est-elle un bon indicateur de compétition ? *Ann. For. Sci.* 59, pp. 41-51.
- Pichler P., Oberhuber W., 2007. Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003. *Forest Ecology and Management* 242, pp. 688-699.
- Plauborg K.U., 2004. Analysis of radial growth responses to changes in stand density for

four tree species. *Forest Ecology and Management* 188, pp. 65-75.

Pomerol C., Renard M., 1997. *Eléments de Géologie*. Masson, 629 p.

Puhe J., 2003. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands – a review. *Forest Ecology and Management* 175, pp. 253-273.

Quentin C., Bigorre F., Bréda N., Granier A., Tessier D., 2001. Etude des sols de la Forêt de Hesse (Lorraine) - Contribution à l'étude du bilan hydrique. *Etude et Gestion des sols* 8(4), pp. 279-292.

Raiskila S., Saranpää P., Fagerstedt K., Laakso T., Löija M., Mahlberg R., Paajanen L., Ritschkoff AC., 2006. Growth rate and wood properties of Norway spruce cutting clones on different sites. *Silva Fennica* 40(2), pp. 247-256.

Rameau J.C., Estrade J., Vadam J.C., Gillet F., Bailly G., 1991. Carte de la végétation de la France : 35 – Vesoul-Belfort. Presses de CNRS.

Rameau J.C., Mansion D., Dumé G., 1993. Flore Forestière Française, Guide écologique illustré, Volume 1 : Montagnes. Institut pour le Développement Forestier, 2419 p.

Rathgeber C., Roche P., 2003. Dynamique spatio-temporelle de la croissance d'un peuplement de pins à crochets dans les Alpes françaises. *C. R. Biologies* 326, pp. 305–315.

Richard et Hainard, 1981. Carte de la végétation de la France : 48 – Annecy. Presses de CNRS.

Rosenthal, P., 1985. Grands traits du Karst Jurassien. In: Univers, le monde souterrain.

Rubino D.L., McCarthy B.C., 2004. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events. *Dendrochronologia* 21(3), pp. 97-115.

Ryan P.J., McKenzie N.J., O'Connell D., Loughhead A.N., Leppert P.M., Jacquier D., Ashton L., 2000. Integrating forest soils information across scales: spatial prediction of soil properties under Australian forests. *Forest Ecology and Management* 138, pp. 139-157.

Sanchez-Rodriguez, F., Rodriguez-Soalleiro, R., Espanol, E., Lopez, C.A., Merino, A., 2002. Influence of edaphic factors and tree nutritive status on the productivity of *Pinus radiata* D. Don plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management* 171, pp. 181-189.

Sandoz JL., 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Sci. Technol.* 27, pp. 373-380.

Sandoz JL., 1996. Ultrasonic solid wood evaluation in industrial applications. 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood 1(12), 7 p.

Sandoz JL., Benoit Y., Demay L., 2000. Wood testing using Acousto-ultrasonic. 12th

International Symposium on Nondestructive Testing of Wood – University of Western Hungary, Sopron, 5 p.

Sauget C., 2004. Une AOC pour les résineux du Massif du Jura : Le milieu socio-économique et le lien au milieu naturel. D.E.S.S. Connaissance et Gestion des Terroirs, Université de Franche-Comté, 79 p.

Seynave I., Gégout JC., Hervé JC., Dhôte JF., Drapier J., Bruno E., Dumé G., 2004. Etude des potentialités forestières pour l'Epicéa commun dans l'est de la France à partir des données de l'IFN. *Revue Forestière Française* 56(6), pp. 537-550.

Smith M.P., Zhu AX., Burt J. E., Stiles C., 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma* 137, pp. 58-69.

Société Forestière de Franche-Comté, 1997. Les Futaies Résineuses Jardinées des Hautes Chaînes du Jura. Société Forestière de Franche-Comté, 31 p.

Société Forestière de Franche-Comté, 2001a. Guide pour le Choix des Essences sur le Deuxième Plateau du Jura. Société Forestière de Franche-Comté, 32 p.

Société Forestière de Franche-Comté, 2001b. Guide pour le Choix des Essences sur les Pentes Intermédiaires Jurassiennes. Société Forestière de Franche-Comté, 32 p.

Société Forestière de Franche-Comté, 2002. Guide régional des habitats forestiers et associés à la forêt. Société Forestière de Franche-Comté, 140 p.

Société Forestière de Franche-Comté, 2003. Guide simplifié des habitats forestiers comtois. Société Forestière de Franche-Comté, 48 p.

Stendahl J., Snäll S., Olsson M.T., Holmgren P., 2002. Influence of soil mineralogy and chemistry on site quality within geological regions in Sweden. *Forest Ecology and Management* 170, pp. 75-88.

Tan B.S., 1983. Rôle du sol dans la régénération du sapin et du climat dans le reboisement des combes à l'étage montagnard du Jura. Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1. 126 p.

Tan B.S., 1988. La régénération du sapin (*Abies alba* Mill.) dans le jura : influence des facteurs physiques, édaphiques et botaniques sur les stades précoces du développement des semis. Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 127 p.

Tavant Y., Bruckert S., 1986. Dynamique saisonnière des matières organiques et de l'azote dans un sol calcimagnésique humifère à l'étage montagnard du Jura. *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Biologie végétale* : 4ème série : fasc. 6, pp. 19-24.

Tessier D., Bruand A., Le Bissonnais Y., Dambrine E., 1996. Qualité chimique et physique des sols : Variabilité spatiale et évolution. *Etude et Gestion des Sols* 3(4), pp. 229-244.

Thomas A.L., King D., Dambrine E., Couturier A., Roque J., 1999. Predicting soil classes

with parameters derived from relief and geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). *Geoderma* 90, pp. 291–305.

Tran A., 2000. Application de la télédétection hyperspectrale à la cartographie et l'étude des formations végétales du marais de Kaw. Rapport PNRZH – MARLITROP, 41 p.

Travers I., 2004. Influence des conditions pédoclimatiques du terroir sur le comportement du pommier et la composition des pommes à cidre dans le Pays d'Auge. Thèse de Doctorat, Université de Caen/Basse Normandie, 124 p.

Tuovinen M., 2005. Response of tree-ring width and density of *Pinus sylvestris* to climate beyond the continuous northern forest line in Finland. *Dendrochronologia* 22, pp. 83-91.

Van Leeuwen C., Seguin G., 2006. The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research* 17(1), pp. 1-10.

Van Lynden G. W. J., Mantel S., 2001. The role of GIS and remote sensing in land degradation assessment and conservation mapping: some user experiences and expectations. *JAG* 3(1), pp. 61-68.

Vaudour E., 2003. Les terroirs viticoles. Dunod, 294 p.

Vidal A., Kerr Y., Lagouarde J.P., Seguin B., 1987. Télédétection et bilan hydrique: Utilisation combinée d'un modèle agrométéorologique et des données de l'IR thermique du satellite NOAA-AVHRR. *Agricultural and Forest Meteorology* 39(2-3), pp. 155-175.

Walter C., 2002. Analyse spatiale des sols en vue de leur gestion précise et de leur surveillance. Habilitation à Diriger les Recherches, Université Henri Poincaré de Nancy, 94 p.

Wang H.F., Shao M.A., 2006. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments. *Advances in Water Science* 17(5), 604-609.

Williams D.A., Wang Y., Borchetta M., Gaines M. S., 2007. Genetic diversity and spatial structure of a keystone species in fragmented pine rockland habitat. *Biological Conservation* 138, pp.256-268.

Zhang Q., Alfaro R.I., Hebdac R.J., 1999. Dendroecological studies of tree growth, climate and spruce beetle outbreaks in Central British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management* 121, pp. 215-225.

Zhu Y., Shao M., 2006. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 22(2), pp. 64-67.

Annexes

Pentes				Affectation des terres	Travail du sol	Irrigation		Assainissement Drainage	Érosion par ruissellement	Terrains de loisirs	
%	Degré	Classe	Appellation			Aspersion	Gravité				
0,15	0°05'	1	Très faible	Généralement cultivable	Pas de contrainte	Pas de contrainte majeure	Drains en travers de la pente	Disposition des drains indifférente	Nulle	Peu de contraintes	
0,5	0°17'	2	Faible					Pas de contrainte	Pente maximale pour les tuyaux		Peu de risques
2	1°08'	3	Faible à modérée					Possible avec techniques adaptées	Drainage		
5	2°51'	4	Modérée		Contraintes mineures	Contraintes spécifiques		Pente maximale pour drains taupes	Risques modérés	Contraintes notables	
10	5°42'	5	Modérée à forte		Contraintes spécifiques	Contraintes majeures		Possible avec aménagement des versants			
15	8°32'	6	Forte	Difficilement cultivable	Matériels et techniques adaptés	Pente maximale épandage boue		Sevrage de mouillères	Risques importants	Contraintes sévères	
20	11°18'	7									
25	14°02'	8									
30	16°42'	9	Très forte	Non					Risques très importants	Contraintes très sévères	
75	36°52'										Limite pâture pour bovins
100	45°	10	Excessive	cultivable							

Classes de pentes et appellations et contraintes associées (Baize et Jabiol, 1995).

Inventaire des étages géologiques (dénomination et faciès dominants) des milieux forestiers du massif jurassien.

Etages	Faciès
AC Colluvions.	Matériel limoneux et caillouteux sans structure
C Colluvions.	Limons plus ou moins sableux et argileux ; Cailloutis calcaires anguleux
E Eboulis.	Gros blocs ; Cailloutis calcaires anguleux à matrice gravo-sableuse
EJ Eboulis ruisselés.	Cailloutis calcaire anguleux à matrice gravo-sablo-limoneuse
Ez Eboulis tardiglaciaires.	Eboulis récents fins
Fgya Alluvion ancienne de bas niveau.	Cailloutis à galets arrondis ou émoussés
Fx Alluvion ancienne de haut niveau.	
Fy Alluvions anciennes.	Graviers, sables et limons
Fyz Alluvions quaternaires indifférenciées.	
Fz Alluvions récentes.	Eléments calcaires à granulométrie variable
Fz2 Alluvions modernes.	
FzT Alluvions tourbeuses.	
G Alluvions glaciaires indifférenciées.	
Gly2 Alluvions glacio-lacustres.	
Gm Alluvions glaciaires morainiques.	
Gx Complexe morainique wurmien indifférencié.	
Gxj Dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires.	
Gy Moraines non sub-divisées.	
Gy2 Moraines.	
Gya Moraines.	
Gyc Moraines caillouteuses.	Cailloutis, graviers et sables
Kz et Ky Glissements.	
LP Limons des plateaux, loess, lehms.	
R Formation résiduelle sur calcaire.	
S Dépôts de gélifraction (ou gélifluxion).	
Uy Turfs postwurmien.	
m2 Burdigalien	
m1b - 2a Helvétien – Burdigalien.	Calcaires argileux et gréseux ; Marnes ; Molasse gréseuse
m Miocène.	Sables blonds molassiques
nU Hauterivien supérieur - Barrémien inférieur - Bédoulien.	Calcaires
n5 Aptien.	Calcaires ; Calcaires marneux légèrement gréseux
n4 - 5U Barrémien – Aptien.	Calcaires compacts et crayeux
n4 - 5 Barrémien – Aptien.	Calcaires bioclastiques
n4 Barrémien.	Bancs calcaires oolithiques ou cristallins, parfois grumeleux ; Calcaires blancs graveleux ; Marnes grumeleuses
n3a Hauterivien inférieur.	Marnes
n3 Hauterivien.	Calcaires en petits bancs, glauconieux, ferrugineux, spathiques, à entroques et oolithiques ; Calcaire argileux ; Calcaires siliceux ; Marnes à intercalations calcaire-gréseuses ; Marnes
n2 Valanginien.	Calcaires oolithiques en bancs ; Calcaires oolithiques graveleux ou compact et dur ; Calcaires marneux ; Marnes ; Intercalations mameuses
n1 - 2 Valanginien.	Calcaires oolithiques en bancs épais ; Mamo-calcaires ; Marnes tendres
n1P Bernisien inférieur.	Calcaires ; Marnes
jP Portlandien – Purbeckien.	Calcaires fins ; Calcaires à oolites ; Calcaires marneux en dalles et en plaquettes ; Dolomies ; Mamo-calcaires ; Marnes ; Argiles
j9P Purbeckien.	Calcaires
j9 Tithonien – Portlandien – Kimméridgien supérieur.	Boues micritiques calcaires ou dolomitiques ; Calcaires massifs en bancs épais à grain fin ; Calcaires cristallins en bancs ; Calcaires en plaquettes ; Calcaires marneux ferrugineux et gréseux
j9 - 8 Portlandien – Kimméridgien supérieur.	
j8R Kimméridgien.	Calcaires blanc-plâtreux, crayeux
j8P Kimméridgien.	Calcaires en plaquettes ; Calcaires lithographiques
j8b Kimméridgien supérieur.	Calcaires compacts, en bancs épais ; Calcaires en plaquettes à silex
j8a Kimméridgien inférieur et supérieur.	Calcaires oolithiques et graveleux ; Calcaires tendres et fins ; Calcaires argileux à joints mameux ; Marnes
j8 Kimméridgien.	Calcaires compacts, à pâte fine, en bancs massifs ; Calcaires argileux fins ; Calcaires massifs clairs plus ou moins oolithiques ou dolomitiques ; Mamo-calcaires ; Marnes grumeleuses ; Intercalations mameuses ; Marnes
j7c - d Kimméridgien inférieur.	Calcaire crayeux, grumeleux (parfois oolithique)
j7c Séquanien supérieur.	Calcaires compacts oolithiques à pâte fine ; Intercalations mameuses
j7b Séquanien supérieur.	Calcaires compacts en bancs réguliers ; Calcaires oolithiques en bancs ; Marnes
j7a Séquanien inférieur – Kimméridgien inférieur.	Calcaires à pâte fine (grumeleux, oolithiques) ; Mamo-calcaires ; Marnes
j7 - 8C Kimméridgien inférieur et supérieur.	Calcaires ; Argiles
j7 - 8a Kimméridgien inférieur et supérieur – Séquanien.	Calcaires compacts en bancs épais ; Calcaires à grain fin en bancs peu épais ; Intercalations mameuses
j7 - 6 Séquanien – Rauracien.	Calcaires oolithiques parfois crayeux ; Calcaires mameux
j7 Kimméridgien inférieur – Séquanien – Tithonien.	Calcaires compacts, durs en bancs massifs ; Calcaires graveleux ou/et oolithiques ; Calcaire à galets ; Mamo-calcaires parfois gréseux et dolomités ; Marnes
j6b Oxfordien supérieur.	Calcaires fins ; Calcaires en plaquettes ; Calcaires fins en bancs ; Interbancs mameux
j6a Kimméridgien inférieur et supérieur – Oxfordien supérieur.	Calcaires graveleux ; Calcaires argileux ; Calcaires à grain fin ; Mamo-calcaires ; Marnes
j6 Oxfordien supérieur – Rauracien.	Calcaires à grain fin ; Lits mameux fins
j5M Argovien mixte.	Mamo-calcaires
j5e Oxfordien supérieur.	Calcaires fins ; Intercalations oolithiques
j5b Oxfordien supérieur.	Mamo-calcaires
j5a - c Oxfordien inférieur à supérieur.	Calcaires ; Marnes
j5A Oxfordien moyen – Argovien.	Calcaires micritiques ; Calcaires argileux stratifiés ; Mamo-calcaires ; Interbancs mameux
j5 - 7 Oxfordien supérieur - Tithonien indifférencié.	Calcaires
j5 - 4 Argovien – Oxfordien.	Marnes
j5 Argovien.	Bancs calcaires ; Calcaires mameux à oolites (en bancs ou en plaquettes) ; Calcaires durs et siliceux ; Calcaires mameux feuilletés ; Marnes feuilletées ; Marnes à chailles ou calcaires ; Marnes
j4 - 5 Oxfordien supérieur – Oxfordien inférieur.	Calcaires mameux
j4 Oxfordien – Oxfordien inférieur – Callovien moyen et supérieur.	Calcaires argileux ; Marnes argileuses ; Marnes
j3a Callovien inférieur.	Calcaires (Dalle nacrée) ; Calcaires oolithiques ; Calcaires mameux ; Mameuses sableuses
j3 Callovien – Bathonien supérieur – Bathonien.	Calcaire oolithique (Dalle nacrée) ; Mamo-calcaires à oolites ferrugineuses ; Marnes
j2 - 3 Bathonien.	Calcaires durs, graveleux à oolithiques ; Calcaires compacts ; Mamo-sableux ; Mamo-calcaires gréseux
j2b Bajocien supérieur – Bathonien supérieur – Callovien.	Calcaires sableux ; Calcaires durs ; Calcaires oolithiques ; Marnes
j2a Bathonien inférieur.	Calcaires oolithiques ; Calcaires-mameux ; Marnes
j2 Bathonien.	Calcaires compacts en bancs épais ; Calcaires graveleux ; Calcaires oolithiques ; Calcaires mameux (à silex ou à chailles) ; Mamo-calcaires ; Marnes
j1c - 2 Bajocien – Bathonien.	Calcaires grumeleux en dalles et plaquettes
j1c Bajocien supérieur.	Calcaires oolithiques massifs en gros bancs (Grande Oolithe) ; Minces intercalations mameuses
j1b Bajocien moyen et supérieur.	Calcaires oolithiques (Grande oolites) ; Calcaires mameux ou sableux ; Calcaires à entroques ; Marnes sèches
j1aP Bajocien.	Calcaires durs (argileux par endroit) ; Calcaires oolithiques
j1a - r Bajocien inférieur.	Calcaires
j1a - b Bajocien inférieur et moyen.	Calcaires
j1a Bajocien moyen et inférieur – Aalénien supérieur.	Calcaires très durs en bancs ; Calcaires oolithiques ; Calcaires gréseux ; Calcaires mameux ; Marnes (sableuses, micacées ou gréseuses) ; Interlits mameux
j1 Bajocien.	Calcaires siliceux fins à grossiers, à chailles
j0 Aalénien supérieur.	Calcaires gréséo-micacés
lj Aalénien.	Calcaires argilo-sableux ; Calcaires oolithiques ; Interlits mamo-sableux
j9b - j1b Aalénien supérieur - Bajocien inférieur et moyen.	Calcaires micacés ; Marnes micacées
l7 - 8 Toarcien – Aalénien inférieur.	Oolites ; Marnes ; Marnes schistoides ; Marnes micacées
l6 Aalénien.	Calcaires ferrugineux
l6 - 5 Aalénien – Thoarcien.	Marnes
l5 - 4 Toarcien – Charmouthien.	Marnes
l4 Charmouthien.	Calcaires mameux ou gréseux ; Marnes

Inventaire des étages géologiques (dénomination et faciès dominants) des milieux forestiers du secteur « nord » du massif jurassien.

Secteur « Nord »	
Etages	Faciès
FzT	Alluvions tourbeuses.
Fz	Alluvions récentes.
Kz et Ky	Glissements.
E	Eboulis.
LP	Limons des plateaux, loess, lehms.
n4	Barrémien.
n3	Hauterivien.
n2	Valanginien.
jP	Purbeckien.
j9	Portlandien.
j8a	Kimméridgien supérieur.
j8	Kimméridgien.
j7c - d	Kimméridgien inférieur.
j7c	Séquanien supérieur.
j7b	Séquanien supérieur.
j7a	Séquanien inférieur – Kimméridgien inférieur.
j7	Séquanien.
j6	Oxfordien supérieur – Rauracien.
j5	Argovien – Oxfordien moyen.
j5 - 4	Argovien – Oxfordien.
j4	Oxfordien – Oxfordien inférieur – Callovien moyen et supérieur.
j3	Callovien – Bathonien supérieur.
j2b	Bathonien supérieur – Callovien.
j2a	Bathonien inférieur.
j2	Bathonien.
j1b	Bajocien supérieur.
j1aP	Bajocien.
j1a	Bajocien inférieur.
lj	Aalénien.
l7 - 8	Toarcien.
l6	Aalénien.
l5 - 4	Toarcien – Charmouthien.

Inventaire des étages géologiques (dénomination et faciès dominants) des milieux forestiers du secteur « centre » du massif jurassien.

Secteur « Centre »	
Etages	Faciès
E	Eboulis.
Fz2	Alluvions modernes.
FzT	Alluvions tourbeuses.
Fz	Alluvions modernes.
Fy	Alluvions anciennes.
Fyz	Alluvions quaternaires indifférenciées.
Gxj	Dépôts glaciaires et fluvioglaciaires.
Gx	Glaciaire.
Gm	Alluvions glaciaires morainiques.
G	Alluvions glaciaires indifférenciées.
n4	Barrémien.
n3	Hauterivien.
n2	Valanginien.
n1 - 2	Valanginien.
jP	Purbeckien.
j9P	Purbeckien.
j9	Portlandien – Kimméridgien supérieur.
j8a	Kimméridgien inférieur.
j8	Kimméridgien – Kimméridgien inférieur.
j7	Séquanien.
j7 - 6	Séquanien – Rauracien.
j6	Rauracien.
j5A	Argovien.
j5M	Argovien mixte.
j5	Argovien.
j3a	Callovien inférieur.
j2 - 3	Bathonien.
j2	Bathonien.
j1c - 2	Bajocien – Bathonien.
j1c	Bajocien supérieur.
j1b	Bajocien moyen.
j1a	Bajocien inférieur – Aalénien supérieur.
l6 - 5	Aalénien – Thoarcien.
l4	Charmouthien.

Inventaire des étages géologiques (dénomination et faciès dominants) des milieux forestiers du secteur « centre-sud » du massif jurassien.

Secteur « Centre-Sud »

Etages	Faciès
R Formation résiduelle sur calcaire.	
C Colluvions.	Limons plus ou moins sableux et argileux ; Cailloutis calcaires anguleux
Ez Eboulis tardiglaciaires.	Eboulis récents fins
EJ Eboulis ruisselés.	Cailloutis calcaire anguleux à matrice gravo-sabo-limoneuse
E Eboulis de gravité.	Cailloutis calcaires anguleux à matrice gravo-sableuse
Gly2 Alluvions glacio-lacustres.	
Gy2 Moraines.	
G Alluvions glaciaires.	
Fgya Alluvion ancienne de bas niveau.	Cailloutis à galets arrondis ou émoussés
Fx Alluvion ancienne de haut niveau.	
Fz Alluvions fluviales, récentes et tourbe.	
m2 Burdigalien	Grès bioclastiques
S Dépôts de gélifraction (ou gélifluxion).	
nU Hauterivien supérieur - Barrémien inférieur - Bédoulien.	Calcaires
n4 Barrémien.	Calcaire cristallin
n3a Hauterivien inférieur.	Marnes
n3 Hauterivien.	Calcaires en petits bancs, glauconieux, ferrugineux, spathiques, à entroques et oolithiques ; Calcaire argileux ; Marnes
n2 Valanginien.	Calcaires oolithiques graveleux ou compact et dur ; Calcaires marneux ; Marnes
n1P Berriasien inférieur.	Calcaires ; Marnes
jP Purbeckien.	Calcaires dolomitiques ; Calcaires marneux ; Argiles dolomitiques ; Marnes
j9 Tithonien – Portlandien.	Boues micritiques calcaires ou dolomitiques ; Calcaires à dolomites ; Calcaires massifs en bancs épais
j9 – 8 Portlandien – Kimmeridgien supérieur.	
j8P Kimmeridgien.	Calcaires en plaquettes ; Calcaires lithographiques
j8R Kimmeridgien.	Calcaires blanc-plâtreux, crayeux
j8 Kimmeridgien supérieur – Kimmeridgien.	Calcaires massifs clairs plus ou moins oolithiques ou dolomitiques ; Calcaires marneux ; Marnes
j7 - 8C Kimmeridgien inférieur et supérieur.	Calcaires ; Argiles
j7 Kimmeridgien inférieur – Séquanien – Tithonien.	Calcaires compacts, durs en bancs massifs ; Calcaires graveleux ou/et oolithiques ; Calcaire à galets ; Calcaires marneux
j6b Kimmeridgien supérieur – Oxfordien supérieur.	Calcaires en plaquettes ; Calcaires fins en bancs ; Interbancs marneux
j6a Kimmeridgien inférieur et supérieur – Oxfordien supérieur.	Calcaires graveleux ; Calcaires argileux ; Marnes
j6 Rauracien.	Marnes
j5 - 7 Oxfordien supérieur - Tithonien indifférencié.	Calcaires
j5e Oxfordien supérieur.	Calcaires fins ; Intercalations oolithiques
j5a - c Oxfordien inférieur à supérieur.	Calcaires ; Marnes
j5 Argovien – Oxfordien moyen.	Calcaires marneux en bancs ; Calcaires marneux en plaquettes ; Marnes
j4 Oxfordien inférieur.	Marnes argileuses
j3 Bathonien – Callovien.	Calcaires à silex ; Calcaires oolithiques ; Calcaires marneux à oolithes ; Marnes
j2b Bajocien supérieur – Bathonien supérieur.	Calcaires durs ; Calcaires oolithiques ; Marnes
j2a Bathonien inférieur.	Calcaires oolithiques ; Calcaires-marneux
j2 Bathonien.	Calcaires oolithiques tendres ou durs ; Calcaires à chailles ; Calcaire-marneux ; Mamo-calcaires ; Marnes
j1b Bajocien supérieur.	Calcaires oolithiques massifs et durs ; Mamo-calcaires ; Marnes
j1a Bajocien moyen et inférieur.	Calcaires très durs ; Calcaires marneux ; Marnes micacées
j1 Bajocien.	Calcaires siliceux fins à grossiers, à chailles
j0 Aalénien supérieur.	Calcaires grés-micacés

Inventaire des étages géologiques (dénomination et faciès dominants) des milieux forestiers du secteur sud du massif jurassien.

Secteur « Sud »

Etages	Faciès
AC Colluvions.	Matériel limoneux et caillouteux sans structure
Uy Tufs postwurmiens.	
E Eboulis.	
Gx Complexe morainique wurmien indifférencié.	
Gya Moraines.	
Gy Moraines non sub-divisées.	
Gyc Moraines caillouteuses.	Cailloutis, graviers et sables
Gya Moraines argileuses (« Argiles à blocs »).	
m1b - 2a Helvétien – Burdigalien.	Calcaires argileux et gréseux ; Marnes ; Molasse gréseuse
m Miocène.	Sables blonds molassiques
n5 Aptien.	Calcaires ; Calcaires marneux légèrement gréseux
n4 - 5 Barrémien – Aptien.	Calcaires bioclastiques
n4 - 5U Barrémien – Aptien.	Calcaires compacts et crayeux
n3 Hauterivien.	Calcaires siliceux ; Marnes à intercalations calcaire-gréseuses
n1 - 2 Valanginien.	Calcaires oolithiques en bancs épais ; Marnes tendres
jP Portlandien – Purbeckien.	Calcaires fins ; Dolomies ; Marnes
j9 Portlandien.	Calcaires compacts en gros bancs ; Calcaires dolomitiques
j8b Kimmeridgien supérieur.	Calcaires compacts, en bancs épais ; Calcaires en plaquettes à silex
j8 Kimmeridgien supérieur.	Calcaires argileux fins ; Intercalations mameuses
j7 - 8a Kimmeridgien inférieur et supérieur – Séquanien.	Calcaires compacts en bancs épais ; Calcaires à grain fin en bancs peu épais ; Intercalations mameuses
j7 Kimmeridgien inférieur.	Calcaires micritiques ou graveleux en banc épais.
j6b Oxfordien supérieur.	Calcaires fins, Interlits marneux
j6a Oxfordien supérieur.	Calcaires à grain fin ; Mamo-calcaires ; Marnes
j6 Oxfordien supérieur.	Calcaires à grain fin ; Lits marneux fins
j5b Oxfordien supérieur.	Mamo-calcaires
j5A Oxfordien moyen.	Calcaires micritiques ; Calcaires argileux stratifiés ; Interbancs marneux
j4 - 5 Oxfordien supérieur - Oxfordien inférieur.	Calcaires marneux
j3 Callovien.	Calcaires oolithiques ; Mamo-calcaires ; Marnes
j2 Bathonien.	Calcaires compacts en bancs épais ; Calcaires marneux à silex ; Mamo-calcaires ; Marnes
j1c Bajocien supérieur.	Calcaires oolithiques ; Marnes intercalations mameuses
j1a - b Bajocien inférieur et moyen.	Calcaires
j1a - r Bajocien inférieur.	Calcaires
i9b - j1b Aalénien supérieur - Bajocien inférieur et moyen.	Calcaires micacés ; Marnes micacées
i7 - 8 Toarcien – Aalénien inférieur.	Oolithes ; Marnes

TRANSECT :

Date :	Carte Géologique :	Lieu :
Région Naturelle :	Unité Géo-topographique :	Longueur :
Coordonnées de départ :		Direction :

Géologie :

Etage :	Perméabilité estimée :		
	☐ Hyperdrainant ☐ Drainant ☐ Indéterminé		
Faciès :	☐ Étanche ☐ Intermédiaire		

Informations complémentaires au verso...

Sondage :

Distance parcourue le long du transect :

Unité Géo-topographique :

Système de pente :

Valeur de la pente :

Position dans le relief:

va – Vallée

pl – Plateau

ve – Versant

Exposition :

Positon topographique :

s – Sommet r – Replat

bp – Bas de pente mp – Mi-pente

hp – Haut de pente d – Doline

Autre :

Peuplement Forestier :

Espèce dominante :

Epicéa commun

Taillis

Sapin pectiné

Taillis sous Futaie

Association :

Autre :

p – Plantation

c – Coupe

Mode de Gestion :

t-

tsf -

SOL

Humus

Sporadique

Type :

Epaisseur :

Couche L : Continue / Sporadique

Epaisseur :

Couche F : Continue / Sporadique

Epaisseur :

Couche H : Continue / Sporadique

Horizons	1	2	3	4
Identification				
Profondeur				
Couleur				
M. O. humifiée				
Texture				
Structure				
Porosité				
Effervescence				
Débris organiques				
Racines				
Eléments grossiers				
Activité biologique				
Taches d'oxydation				
Taches de réduction				
Pellicule calcaire				

Nom Génétique :

Sigle :

Nature de l'obstacle :

Contrainte :

Perrosité (p_{xy})

☐ K - Banc calcaire dur (roche mère)	☐ I - Sensibilité à la sécheresse	Taille des cailloux (x) : ☐ < 8 cm ☐ > 8 cm				
☐ S - Cailloutis graveleux	☐ e - Sensibilité à l'érosion	Abondance des cailloux (y) : ☐ < 15 % ☐ 15 – 30 % ☐ > 30 %				
☐ J - Calcaire poudreux	☐ p - Pierrosité	Lapiaz : ☐ oui ☐ non hauteur :				
☐ T - Horizon tassé	☐ g - Manque d'oxygène					
☐ M - Calcaire marneux	☐ h - Hydromorphie					
☐ N - Nappe						
☐ To - Horizon tassé argileux	Profondeur :					
☐ W - Moraine	☐ 0 - 10 cm	☐ 1 - 20 cm	☐ 2 - 30 cm	☐ 3 - 40 cm	☐ 4 - 50 cm	
☐ O - Argile	☐ 5 - 60 cm	☐ 6 - 70 cm	☐ 7 - 80 cm	☐ 8 - 90 cm	☐ 9 - 100 cm	
☐ E - Horizon limoneux siliceux	☐ K - Cailloux calcaires					

Informations complémentaires au verso...
--

AOC « Bois du Jura » - Phase Stationnelle

Cartographie systématique

Station :

Localisation :

Date :

Pente :

K											
J											
I											
H											
G											
F											
E											
D											
C											
B											
A											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

(profondeur du sol en centimètres)

AOC « Bois du Jura » - Phase Stationnelle

~ Etude pédologique ~

Station :	Date :	Coordonnées GPS :		
Valeur de la pente : Position dans le relief : <i>O va – Vallée</i> <i>O pl – Plateau</i> <i>O ve – Versant</i>	Position topographique : <i>O s – Sommet O r – Replat</i> <i>O bp – Bas de pente O mp – Milieu de pente</i> <i>O hp – Haut de pente O d – Doline</i> Autre :	Exposition :		
Peuplement sylvicole : Type de gestion : Espèces végétales associées :				
Géologie : Faciès de la roche : Fissures : Fractures :		Perméabilité : <i>O id – Indéterminé</i> <i>O dr – Drainant</i> <i>O hy – Hyper-drainant</i> <i>O et – Etanche</i> <i>O in – Inondable</i>		
Humus (A0):	Couche L : <i>O Continue</i> <i>O Sporadiq.</i>	Couche F : <i>O Continue</i> <i>O Sporadiq.</i>	Couche H : <i>O Continue</i> <i>O Sporadiq.</i>	
Humidité du profil :				
Horizon	1	2	3	4
Identification	A			
Profondeur				
Limite				
Couleur				
Couleur codée				
MO humifiée				
Texture				
Structure				
Porosité				
Effervescence				
Débris organiques				
Racines				
Eléments gross.				
Activ. Biologique				
Taches oxydation				
Taches réduction				
Pellicule calcaire				
Charbon				
Nom génétique :		Sigle :		

Nature de l'obstacle :	Contrainte :	Profondeur :
O K – Banc calcaire dur	O i – Sensibilité à la sécheresse	Lapiaz :
O S – Cailloutis graveleux	O e – Sensibilité à l'érosion	
O J – Calcaire poudreux	O p – Pierrosité	
O T – Horizon tassé	O g – Manque d'oxygène	
O M – Calcaire Mameux	O h – Hydromorphie	
O N – Nappe		
O To – Horizon tassé argileux	Pierrosité (p _{xy}) :	
O W – Moraine	Taille des cailloux (x) : O <8cm O >8cm	
O O – Argile	Abondance (y) : O <15% O 15-30% O >30%	
O E – Horizon limoneux siliceux	Volume :	
O k – Cailloux calcaires	Forme :	

Humidité : sec, humide ou saturé.

Limite : Régulière, ondulée, irrégulière, glossique.

MO humifiée: de 0 à 5, 5 correspond à noir.

Structure : polyédrique, polyédrique émoussée, grumeleuse, particulaire, massive, micro-grumeleuse, fibreuse.

Porosité : de 0 à 5, 5 correspondant à 40%.

Effervescence : intensité.

Racines : abondance, peu : <8/dm³, moyen : 3-5, nombreuses : >5.

Activité biologique : turricules, galeries, insectes..etc

Taches d'oxydation et de réduction : pourcentage de la surface.

Nom génétique : nomenclature de la FAO et française.

Forme des cailloux : arrondis, allongés, aplatis, irréguliers.

Lapiaz : si présents, hauteur en centimètres.

AOC « Bois du Jura » - Phase Stationnelle

~ Etude du peuplement sylvicole – localisation des arbres ~

Station :

Localisation :

Date :

AOC « Bois du Jura » - Phase Stationnelle

~ Etude du peuplement sylvicole – mesures ~

Station :

Localisation :

Date :

(diamètre et hauteur en cm.)

Arbre	Espèce	Hauteur	Diamètre	Arbre	Espèce	Hauteur	Diamètre
1				41			
2				42			
3				43			
4				44			
5				45			
6				46			
7				47			
8				48			
9				49			
10				50			
11				51			
12				52			
13				53			
14				54			
15				55			
16				56			
17				57			
18				58			
19				59			
20				60			
21				61			
22				62			
23				63			
24				64			
25				65			
26				66			
27				67			
28				68			
29				69			
30				70			
31				71			
32				72			
33				73			
34				74			
35				75			
36				76			
37				77			
38				78			
39				79			
40				80			

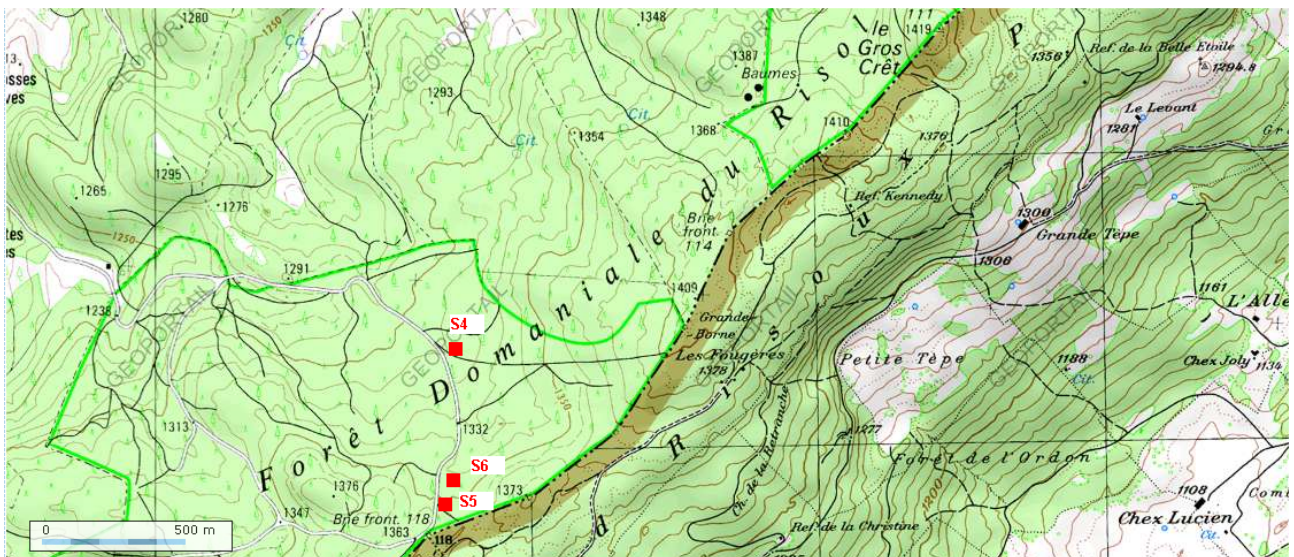
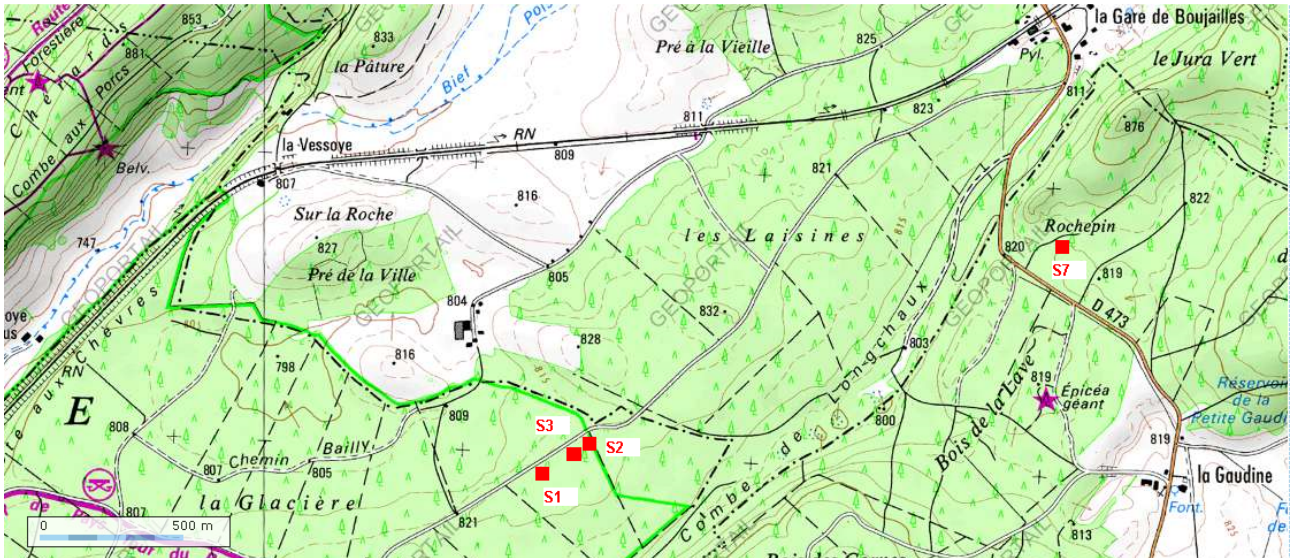
Espèces associées :

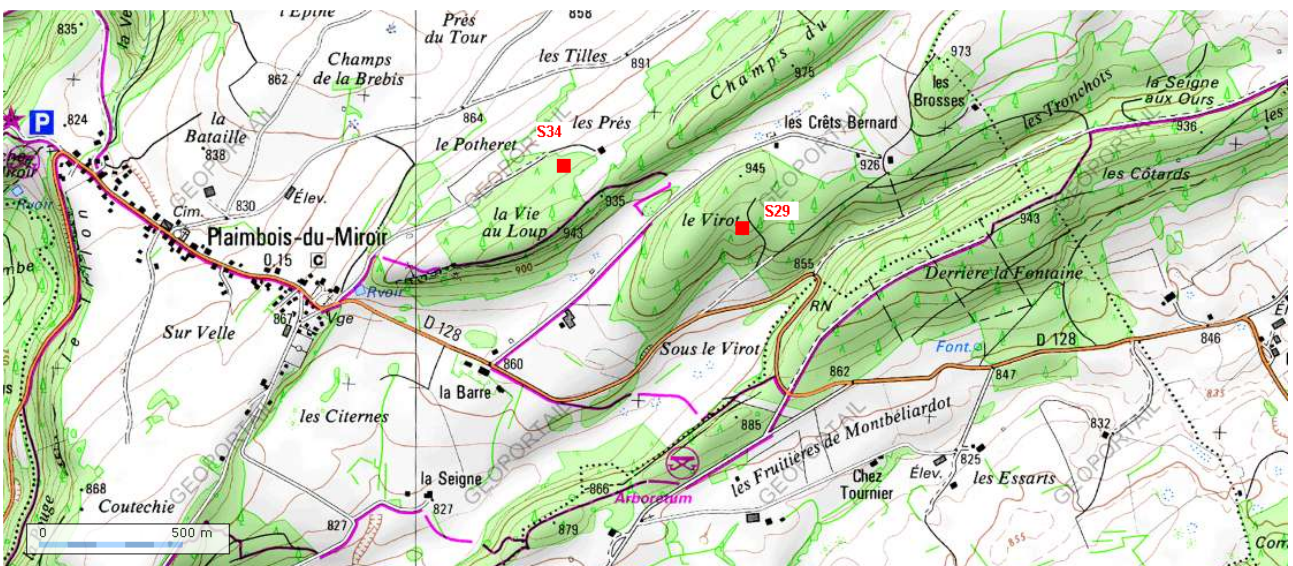
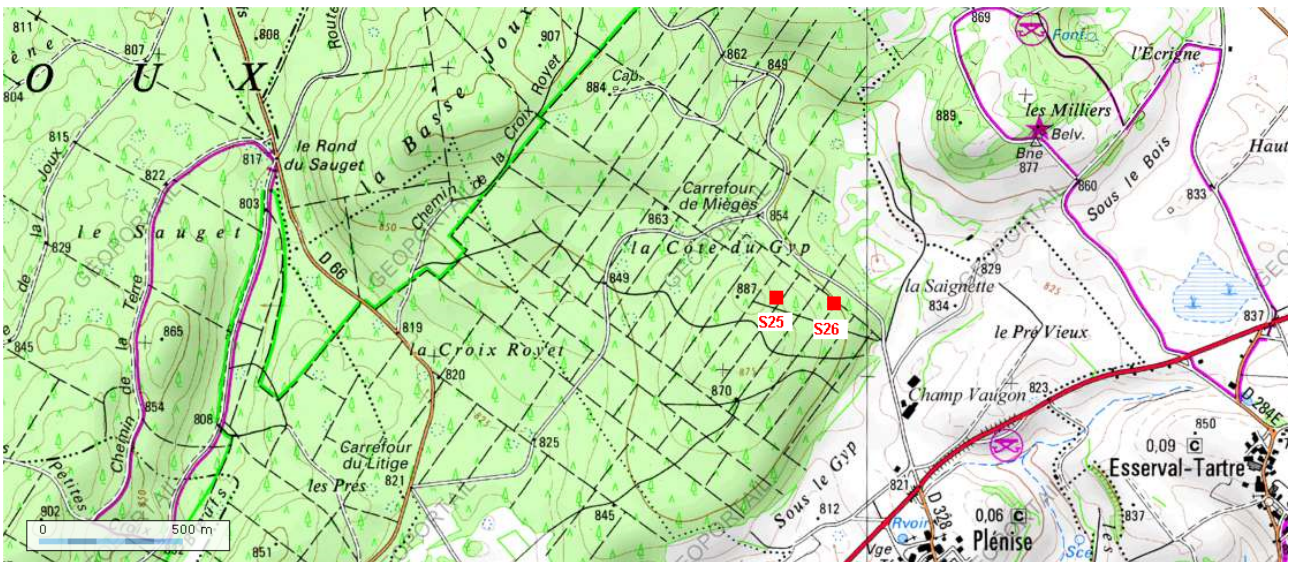
~ Etude du peuplement sylvicole – mesures au Sylvatest ~

Localisation :

[illegible]

Cartes IGN (Géoportail.fr), au 1/16000, localisant les stations d'étude.





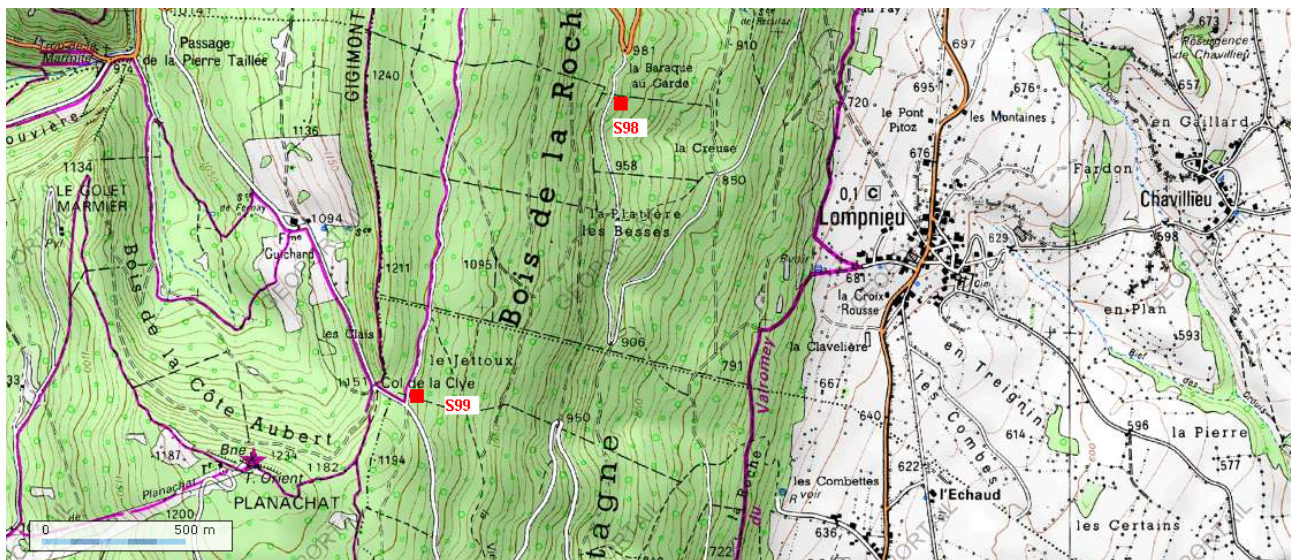


Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique.....	3
1. Introduction.....	3
2. Terroir – AOC.....	3
2.1. Les bois jurassiens.....	3
2.2. Les terroirs viticoles.....	4
2.3. Autres exemples de terroirs.....	5
2.4. Autres appellations.....	5
3. Sols jurassiens - Cartographie pédologique.....	5
3.1. Etudes régionales.....	5
3.2. Typologie des sols.....	6
3.3. Contexte calcaire et sols caillouteux.....	6
3.4. Relations sol-résineux.....	6
3.5. Description et propriétés des sols.....	7
3.6. Méthodes d'échantillonnage – Cartographie.....	8
4. Traitement statistique – Spatialisation.....	8
4.1. Définition des unités.....	8
4.2. Changements d'échelle.....	9
4.3. Traitement statistique et modélisation.....	10
4.4. Outils numériques – Télédétection.....	11
4.5. Exemples d'applications.....	12
5. Forêt : typologie et paramètres fonctionnels.....	12
6. Dendro-écologie - Qualité du bois.....	13
6.1. Mesures de qualité du bois.....	13
6.2. Dendrométrie et croissance.....	14
6.3. Structure du bois.....	14
6.4. Propriétés stationnelles.....	14
6.5. Climat.....	16
6.6. Sol.....	17
6.7. Gestion forestière et sylviculture.....	18
6.8. Dendro-écologie.....	19
7. Conclusion.....	20
Chapitre 2 : Caractéristiques écologiques et organisation du massif du Jura - Sélection de zones de référence.....	23
1. Introduction.....	23
2. Zone d'étude – Le massif du Jura.....	23
2.1. Géo-morphologie.....	23
2.1.1. Histoire du massif Jurassien.....	26
2.1.2. Inventaire des étages géologique des massifs forestiers.....	28
2.2. Climat.....	29
2.3. Caractéristiques générales des sols (forestiers) du massif jurassien.....	32
3. Espèces étudiées.....	38
3.1. Epicéa commun (<i>Picea abies</i> L.).....	38
3.2. Sapin pectiné (<i>Abies alba</i> Mill.).....	40
3.3. Les forêts du massif du Jura.....	43
4. Le zonage « AOC Bois du Jura ».....	44

4.1. Recensement de l'information cartographique.....	45
4.2. La démarche scientifique de l'étude.....	47
5. Les zones de référence (ZR).....	48
5.1. Zone de référence 1 : axe Levier / Frasné / Mouthe (partie centrale du massif) (Figure 2.25).	48
5.2. Zone de référence 2 : axe Sancey-le-Grand / Pierrefontaine-les-Varans / Le Russey (partie « nord » du massif) (Figure 2.26).....	50
5.3. Zone de référence 3 : axe St Rambert-en-Bugey / Hauteville-Lompnès / Brenaz / Seyssel (partie « sud » du massif) (Figure 2.27).....	52
5.4. Zone de référence 4 : axe Morez / Lamoura / Gex (partie centre-« sud » du massif) (Figure 2.28).	52
6. Conclusion.....	53
Chapitre 3 : Phase 1 - Spatialisation des propriétés des sols forestiers du massif du Jura.....	55
1. Introduction.....	55
2. Cartographie des sols des zones de référence.....	56
2.1. Délimitation des unités géologiques (UG).....	56
2.2. Délimitation des unités topographiques (UT).....	58
2.3. Délimitation des unités pédologiques : les unités topo-géologiques (UTG).....	59
2.4. Contenu des unités pédologiques.....	63
2.4.1. Méthode d'échantillonnage.....	63
2.4.2. Description des sols.....	65
2.4.3. Analyse des transects.....	66
2.4.3.1. Analyse des distances.....	66
2.4.3.2. Tris et regroupements des sigles morpho-édaphiques.....	69
2.4.3.3. Indice synthétique de qualité édaphique des sols.....	74
2.4.3.4. Analyse des données CERU.....	74
2.4.4. Typologie du contenu des unités pédologiques (UCS).....	81
3. La cartographie des propriétés des sols du massif du Jura.....	87
3.1. Unités géologiques (UG).....	87
3.2. Unités topographiques (UT).....	87
3.3. Unités Topo-Géologiques (UTG).....	87
3.4. Carte des complexes de sols (UCS).....	87
4. Discussion.	93
5. Conclusion.....	97
Chapitre 4 : Phase 2 - Etude stationnelle.....	100
1. Introduction.....	100
2. Choix des stations.....	102
3. Matériel et méthodes.....	104
3.1. Localisation et caractérisation des stations.....	104
3.2. Peuplement forestier.....	106
3.3. Étude détaillée du sol.....	109
3.3.1. Cartographie systématique de la profondeur du sol.....	109
3.3.2. Description du sol.....	110
3.3.3. Analyses en laboratoire.....	111
3.4. Suivi climatique.....	112
4. Résultats.....	113
4.1. Sol.....	113
4.2. Dendrométrie et vitesse de propagation des ondes ultrasoniques.....	128

4.3. Croisement des données écologiques et des données sylvicoles.....	137
4.4. Données météorologiques.....	152
5. Discussion.....	156
6. Conclusion.....	160
Chapitre 5 : Zonage des potentialités sylvicoles.....	163
1. Introduction.	163
2. Matériel et méthodes.	164
2.1. Définition des unités écologiques.....	164
2.2. Spatialisation des données stationnelles et intégration au zonage écologique.....	164
2.3. Cartes thématiques.....	165
3. Résultats.....	168
3.1. Spatialisation des données stationnelles.	168
3.2. Zonage de potentialité sylvicole.....	169
3.3. Cartes thématiques.....	169
4. Discussion.....	178
4.1. Grands traits écologiques des forêts du massif et diversité.....	178
4.2. Originalité du terroir jurassien.....	179
5. Conclusion.....	180
Conclusion générale.....	183
Références bibliographiques.....	186
Annexes.....	202

Résumé

Depuis 2001, les produits forestiers peuvent, au même titre qu'un produit alimentaire, prétendre à une reconnaissance en Appellation d'Origine Contrôlée (AOC). Comme le laissait supposer les études de notoriété des bois résineux du massif du Jura, les premières études sur leur résistance mécanique les classent parmi les meilleurs bois d'Europe. Cette étude a permis de déterminer les critères écologiques déterminant les spécificités des bois du Jura afin de permettre aux gestionnaires d'appuyer la future délimitation de l'AOC sur des éléments objectifs. La démarche scientifique s'appuie sur les études antérieures de caractérisation des terroirs viticoles (Vaudour, 2002) et fromagers (Monnet, 1996). Les critères écologiques pris en compte sont principalement les données climatiques et pédologiques. Un protocole de cartographie des sols forestiers du massif jurassien a été défini de façon stratifié et hiérarchisé. Il est basé sur la variabilité des compartiments géologiques et la topographie (unité "géo-topographique"). Le massif a été découpé en quatre zones de référence à l'intérieur desquelles un échantillonnage a été réalisé pour décrire la diversité et l'abondance des sols dans chaque unité géo-topographique aboutissant à 13 unités complexes de sols (UCS). La description morphologique des sols a été réalisée pour évaluer leurs propriétés édaphiques, à l'aide d'un indice synthétique (CERU). Sur la base de ces données, 27 stations représentatives ont été sélectionnées pour leur variabilité des conditions locales sur l'ensemble du massif pour préciser les relations entre les conditions stationnelles et les caractéristiques du peuplement sylvicole. Sur chaque station, une étude détaillée du sol est réalisée (description du profil, pierrosité, carte systématique de la profondeur). Les arbres sont mesurés et localisés avec précision à l'intérieur de la station. Les mesures dendrométriques ont été complétées par des mesures ultrasonores de qualité mécanique du bois. Les résultats ont montré qu'il existe une influence significative de la richesse nutritive de la station et de la réserve utile individuelle sur la densité du bois de résineux du massif. Les arbres présentent une densité plus importante lorsqu'ils sont localisés sur des stations au pH_{eau} élevé et ayant accès à un volume de sol important. La répartition géographique des stations d'étude a permis de montrer qu'il n'existait pas d'effet de l'altitude. A conditions pédologiques voisines, il n'y aura pas de différence entre deux stations à des altitudes différentes. L'ensemble des conditions écologiques est homogène à l'échelle du massif du Jura, malgré une variabilité qui peut s'avérer importante à une échelle locale. Cette étude a également confirmé que les sapins et les épicéas du massif étaient des arbres d'une grande qualité selon une variabilité relativement faible. De part son contexte (précipitations importantes, roche calcaire, gamme d'altitude moyenne, pentes variées et sols brunifiés), le terroir jurassien est original. Au-delà du zonage AOC "Bois du Jura", ces données apportent des informations nouvelles sur les relations propriétés des sols et les roches et sur la dimension spatiale des relations sol-arbre.

Mots clés : AOC, qualité du bois, cartographie du sol, changement d'échelle, relation sol-arbre, *Abies alba*, *Picea abies*.

Summary

Since 2001, forest products can be recognized with a quality label (Appellation d'Origine Contrôlée in France) like food products. Sociological studies suggest the coniferous wood in Jura Mountains (France) have a well-establish fame. The first studies about mechanical quality have showed the wood is among the best in Europe. This study has identified ecological parameters determining the wood specificities in Jura Mountains to help industrial actors to define the future delimitation of the AOC with objectives and scientific arguments. This approach is based on previous studies characterizing wine "terroirs" (Vaudour, 2002) and cheese "terroirs" (Monnet, 1996). Climate and soil were the base of environmental parameters. A protocol for mapping forest soils of Jura Mountains has been defined with stratified and hierarchical approach. It is based on the variability of geological compartments and topography ("geo-topographical" units). The study area was divided with four reference areas. This sampling was conducted to describe the diversity and abundance of soil in each geo-topographical units resulting in 13 complex soils units (UCS).

The morphological description of soil was conducted to evaluate soil properties, using a synthetic index (CERU). Based on these data, 27 representing stations were selected for their variability in local properties in the Jura to study relationships between ecological properties and tree characteristics. For each station, a detailed soil study is realised (soil description, stoniness, systematic depth map). Trees are measured and located into the station. Dendrometric measurements were completed by ultrasonic measurements of mechanical wood quality. The results showed there is a significant influence of nutrients richness and individual water capacity of soil on wood density. Trees have a higher density if they are located on stations with a elevated pH and with a large soil volume. The geographical distribution of stations has shown that there is no altitude effect. On similar soil conditions, there will be no difference between two stations at different altitudes. The environmental conditions are homogeneous throughout the Jura mountains, despite a variability that may be important at a local scale. This study also confirmed that the pines and spruces of Jura have got high quality wood with a relatively low variability. Part of its context (rainfall, limestone, range of average altitude, slope and brunisols), Jura mountains are originals. For AOC "Bois du Jura delimitation, these data provide new information on soil and bedrocks properties and spatial soil-tree relationships.

Keywords : AOC, wood quality, soil mapping, scaling, soil-tree relationships, *Abies alba*, *Picea abies*.