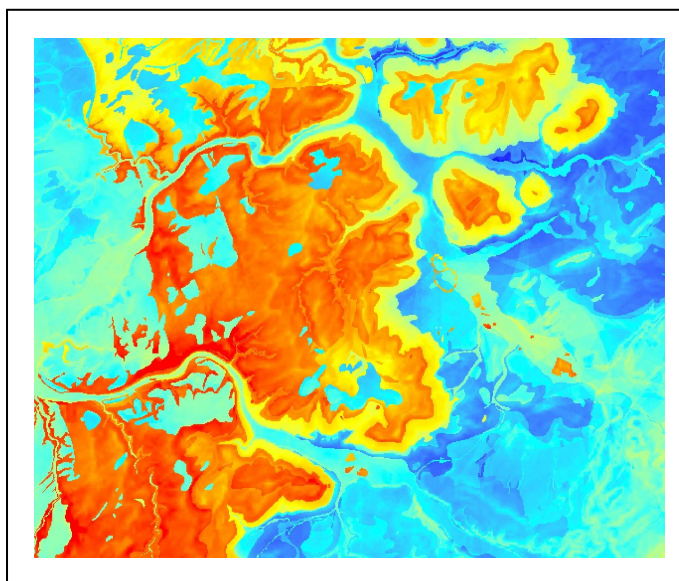


Cartographie prédictive à haute résolution de la réserve utile maximale du sol dans le Nord-Est de la France

Mémoire de fin d'études



Cartographie prédictive à haute résolution de la réserve utile maximale du sol dans le Nord-Est de la France

Mémoire de fin d'études

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

Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech ENGREF	TRAVAUX D'ÉLÈVES
TITRE : Cartographie prédictive à haute résolution de la réserve utile maximale du sol dans le Nord-Est de la France	Mots clés : Réserve utile maximale, cartographie prédictive, haute résolution
AUTEUR : Thomas VILLIERS	Promotion : FIF 19^e
Caractéristiques : 1 volume ; 47 pages ; 25 figures ; 5 tableaux ; 3 annexes	

CADRE DU TRAVAIL

ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : AgroParisTech ENGREF - LERFOB

Nom du responsable : Christian PIEDALLU
Fonction : Ingénieur de recherche

Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) : Christian PIEDALLU

Tronc commun
Option
D. d'approfondissement

Stage en entreprise
Stage à l'étranger
Stage fin d'études
Date de remise : 23/08/11

Autre

Contrat avec Gref Services Nancy OUI NON

SUITE À DONNER (réservé au service des études)

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

Résumé :

Une cartographie prédictive de la réserve utile maximale des sols forestiers a été réalisée au pas de 50m pour le Nord-Est de la France. Des covariables géologiques et topographiques ont été utilisées pour élaborer le modèle statistique. La validation de la carte a permis de définir la précision et les limites d'utilisation pour le gestionnaire. Des améliorations sont proposées pour perfectionner la qualité prédictive du modèle. Dans la perspective des changements climatiques, la carte de la réserve utile maximale est une donnée très utile pour le gestionnaire et les usages possibles sont listés. Le travail pourrait alors être étendu sur d'autres régions.

Summary :

A predictive mapping of the soil water holding capacity has been made with a 50-meters resolution for the North-East of France. Geological and topographical data have been used to build the statistical model. The validation of the map allowed defining the precision and limits of use for the forest managers. Improvements are proposed to increase the accuracy of the model's predictions. A predictive mapping of the soil water holding capacity is very useful for the forest manager to better understand and mitigate the consequences of climate change. Additionally the possible uses for such a map are listed. This work could be extended to other regions.

Remerciements :

Merci à Christian Piedallu, mon maître de stage, pour avoir partagé son précieux temps alors que sa thèse accaparait déjà ses jours et ses nuits ...

Merci à Jean-Baptiste et Grégoire pour les discussions techniques et la bonne humeur partagées. Ca n'a pas été évident de se remettre en question sur les nouveaux outils informatiques parmi ces futurs ingénieurs prometteurs.

Et merci à toute l'équipe du Lerfob pour tous les bons moments passés à Nancy !

Table des matières :

Remerciements	6
Table des matières	8
Table des annexes	10
Liste des figures	11
Liste des tableaux	13
1 Introduction	15
2 Réserve utile maximale des sols : définition et cartographie à haute résolution	16
2.1 Définition et estimation	16
2.2 Historique et situation actuelle	17
2.3 La cartographie de la réserve utile maximale des sols forestiers en France	17
3 Objectifs du stage	18
4 Méthode utilisée	19
4.1 Site étudié	19
4.2 Méthodologie générale	20
4.3 Données utilisées	23
4.3.1 Données IFN : méthode de calcul de la RUM à partir d'Al Majou (FPT)	23
4.3.2 Données géologiques	24
4.3.2.1 Principe général pour l'harmonisation de la géologie	24
4.3.2.2 Précisions sur la méthodologie mise en place pour l'harmonisation de la géologie	26
4.3.3 Données topographiques et hydrologiques	29
4.3.4 Données climatiques	30
4.4 Méthodologie utilisée pour modéliser la RUM	32
5 Modélisation et cartographie de la réserve utile maximale des sols forestiers	33
5.1 Résultats de la modélisation	33
5.2 Cartographie numérique de la RUM au pas de 50m (avant krigeage des résidus)	37
5.3 Analyse et krigeage des résidus	38
5.4 Cartographie numérique de la RUM au pas de 50m (après krigeage des résidus)	40
5.5 Calcul du déficit hydrique estival (Méthode de Thornthwaite)	41
6 Validation de la carte des RUM et limites de la méthodologie	42

6.1 Validation de la carte des RUM sur l'ensemble de la zone d'étude	43
6.2 Validation du modèle à des échelles plus locales	44
6.2.1 Validation du modèle à l'échelle du massif.	46
6.2.2 Validation du modèle à l'échelle de la forêt	46
6.2.1 Validation du modèle à l'échelle de la parcelle ou du groupe de parcelles.....	48
6.3 Comparaison entre la cartographie au pas de 500m et la cartographie au pas de 50m – améliorations apportées	49
7. Limites et améliorations possibles de la qualité prédictive de la carte des RUM au pas de 50m	51
7.1. Les limites et améliorations liées aux relevés et à l'estimation de la RUM utilisés dans la calibration du modèle	51
7.2 Les limites et améliorations liées à la précision des variables utilisées dans le modèle.....	52
7.3 Les limites et améliorations liées à la validation du modèle	53
8. La cartographie de la RUM à haute résolution, un nouvel outil pour les gestionnaires forestiers	53
8.1 Un nouvel outil pour appréhender les stations forestières : une nécessité face aux changements climatiques	53
8.1.1 Le pas de 50m, une échelle utile au gestionnaire pour appréhender les stations forestières et leur cartographie au niveau local	54
8.1.2 Apport de la RUM comme donnée complémentaire des typologies de stations pour évaluer la capacité des essences à résister aux changements climatiques – discussion en lien avec l'étude de JB Richard sur la caractérisation des contraintes hydriques	55
8.1.3 Apport de la RUM au pas de 50m pour affiner les clés de détermination des typologies de stations forestières et leur cartographie automatisée	57
8.2 Vers une nouvelle approche de la gestion forestière	58
8.2.1 La RUM à haute résolution comme outil de prédiction et de spatialisation d'autres données forestières à haute résolution	58
8.2.2 L'utilisation de ces nouveaux outils fait évoluer l'approche de l'aménagement forestier mais nécessite une simplification et une vulgarisation pour faciliter le transfert des connaissances à la gestion	59
8.2.3 Une approche à étendre à l'ensemble des régions	60
9 Conclusion	63
10 Bibliographie	64

Table des annexes :

Annexe 1 : Log stratigraphique de la Lorraine (<http://www3.ac-nancy-metz.fr/base-geol/>)

Annexe 2 : Extrait de la carte de la réserve utile maximale des sols forestiers au pas de 500m dans le Nord-Est de la France

Annexe 3 : Clé des stations forestières de la bordure Sud-Ouest du Massif Central

Liste des figures :

Figure 1 : Schéma de la Réserve utile maximale d'un sol	16
Figure 2 : Contour de la zone d'étude	20
Figure 3 : Modèle SCORPAN	21
Figure 4 : Exemple de profil topographique	21
Figure 5 : Méthodologie utilisée pour la cartographie de la Réserve Utile Maximale des sols au pas de 50m en Lorraine	23
Figure 6 : Carte géologique simplifiée en 31 unités	26
Figure 7 : Avantages / inconvénients des deux méthodes d'harmonisation de la géologie ...	28
Figure 8 : Impact de la méthode d'harmonisation de la géologie sur la qualité de la corrélation	28
Figure 9 : Relation entre la RUM et la pente locale (pixel de 150m, expression logarithmique) en fonction du type de roche	35
Figure 10 : Relation entre la RUM et la pente aux pas de 1500m et 150m (expression logarithmique)	36
Figure 11 : Relation entre la RUM et l'indice de courbure (pixel de 250m)	37
Figure 12 : Carte de la RUM des sols forestiers au pas de 50m avant krigeage (Nord-Est) ...	38
Figure 13 : Représentation cartographique des résidus du modèle de RUM (jeu de calibration IFN)	39
Figure 14 : Carte à haute résolution de la RUM des sols forestiers du Nord-Est de la France	40
Figure 15 : Représentation du déficit hydrique estival	41
Figure 16 : Cartographie à haute résolution du déficit hydrique estival (en mm) sur le Nord-Est de la France	42
Figure 17 : Représentation cartographique des résidus après krigeage (jeu de validation IFN)	44
Figure 18 : Valeurs des R^2 et RMSE par rapport au jeu de validation, en fonction de l'échelle	45
Figure 19 : Comparaison des valeurs de RUM prédites et mesurées sur le site de Bure (55)	46

Figure 20 : Comparaison des valeurs de RUM prédites et mesurées sur le site de Villey le sec – Bois l’Evêque (maillage de 250m) – 54	47
Figure 21 : Comparaison des valeurs de RUM prédites et mesurées sur le site de Bois l’Evêque (maillage de 50 et 100m) – 54	48
Figure 22 : Représentation cartographique de l’amélioration de la prédiction entre le pas de 50m et le pas de 500m	50
Figure 23 : Comparaison de la précision des pixels entre les cartes aux pas de 50 et 500m	50
Figure 24 : Détail d’un extrait de carte / site de Villey le sec – Bois l’Evêque	54
Figure 25 : Exemple de tableau descriptif complémentaire aux typologies de stations forestières	56

Liste des tableaux :

Tableau 1 : RUM moyenne et écart type pour les 31 unités géologiques utilisées	25
Tableau 2 : Correspondance de dureté en lien avec la RUM	27
Tableau 3 : Liste des variables explicatives utilisées afin de modéliser la RUM	32
Tableau 4 : valeurs des coefficients de la pente, en fonction de la zone saisie	33
Tableau 5 : Coefficients, erreur standard, t et p value des variables du modèle de RUM ...	34

1 Introduction

Les catalogues de stations forestières ont été réalisés dans la perspective d'un climat constant sur le long terme. Or les gestionnaires forestiers rencontrent des difficultés pour les utiliser dans le contexte de changement climatique. Pour mettre à jour les typologies de stations forestières, il s'agit de bien comprendre les effets de ces changements sur la distribution et la croissance des essences. Le bilan en eau est alors une donnée fondamentale à prendre en compte (Lindner et al, 2010). Afin de calculer les valeurs de bilan eau, la réserve utile maximale des sols (RUM), capacité de stockage en eau du sol, est croisée avec les données de précipitations et d'évapotranspiration. Il s'agit, dans cette étude, de mettre au point une méthode pour cartographier la RUM au pas de 50m et, in fine, le bilan en eau.

A l'aide de modèles statistiques, il est possible de prédire une variable telle que la RUM à partir d'autres variables caractéristiques du milieu. Les données informatiques disponibles ont déjà permis de cartographier la RUM au pas de 1km (Piedallu et al, 2010a) puis de 500m (Piedallu, 2010b), en utilisant notamment la géologie au 1/1 000 000ème. Avec l'utilisation de variables plus précises, telles que la géologie au 1/50 000ème, est-il possible de descendre la résolution de la carte des RUM au pas de 50m. Quel est l'intérêt de disposer d'une carte au pas de 50m plutôt qu'au pas de 500m ? Quels usages sont alors possibles ?

La RUM est une donnée difficile à modéliser avec précision du fait de son hétérogénéité spatiale. Sa cartographie nécessite de bien appréhender la géomorphologie et le lien qui peut exister entre les différentes variables. Une approche basée sur les relations entre les caractéristiques du milieu peut-elle alors suffire pour prédire avec précision la RUM ? Quelles sont les possibilités d'amélioration de cette approche ?

L'étude a été réalisée dans le cadre du RMT AFORCE, réseau mixte technologique, consacré à l'adaptation des forêts au changement climatique. Elle s'inscrit dans le thème relatif à l'amélioration des connaissances liées aux stations forestières, et fait partie du projet intitulé « Caractérisation de la contrainte hydrique des sols pour prendre en compte les effets des changements climatiques dans les stations forestières » et mené par C.Piedallu et JB.Richard.

Du fait des changements climatiques, il est important de pouvoir concevoir de nouveaux outils synthétiques complétant l'approche actuelle des stations forestières afin d'adapter la gestion. Mais dans quelle mesure la RUM peut-elle contribuer à l'amélioration des connaissances dans ce domaine et comment transférer ces nouvelles connaissances ? Ce dernier point est crucial car les gestionnaires, actuellement dans l'incertitude, ont un besoin urgent.

La cartographie de la RUM présente des limites liées à la qualité de la donnée d'entrée, à la précision de la modélisation mais aussi des limites d'utilisation. Quelles sont alors les précautions que les gestionnaires doivent respecter pour avoir un bon usage de la donnée ?

Avant de fixer les objectifs du stage, il est important d'abord de bien définir les notions de réserve utile maximale et de cartographie prédictive à haute résolution.

2 Réserve utile maximale des sols : définition et cartographie à haute résolution

2.1 Définition et estimation

La réserve utile maximale des sols (RUM) permet de caractériser la capacité maximale d'un sol à stocker l'eau utilisable par les végétaux. Elle se calcule par la différence entre :

- la teneur volumique en eau à la capacité au champ,
- le point de flétrissement pour le volume de terre prospectable par les végétaux.

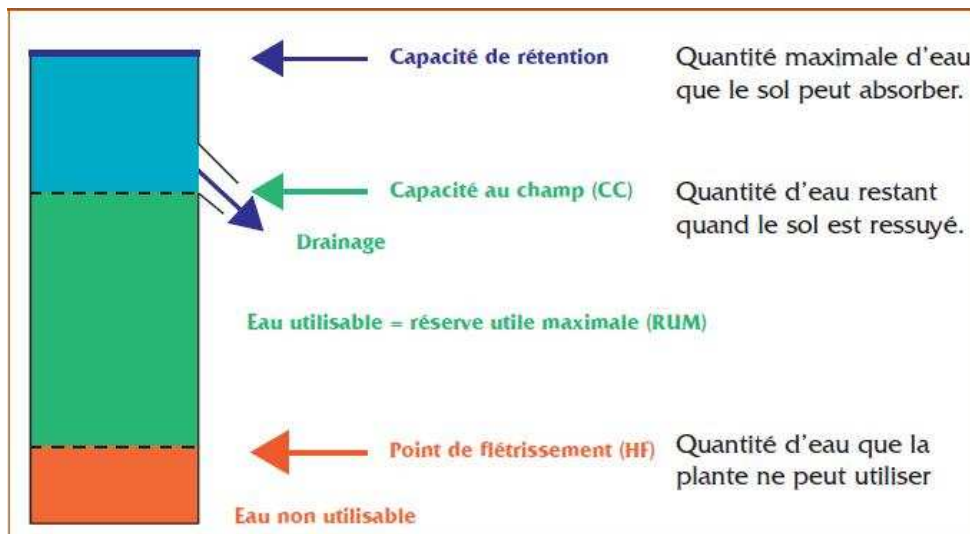


Figure 1 : Schéma de la Réserve utile maximale d'un sol (Nebout, 2010)

La RUM des sols peut être calculée à partir des relevés de l'Inventaire Forestier National (Piedallu et al, 2010a). Le sol est décrit de la façon suivante par l'IFN :

- les 60 premiers cm sont creusés à la pioche. Au-delà, si possible, le sondage se poursuit à la terrière pédologique, la profondeur de description est volontairement seuillée à 1m,
- le profil est découpé en 2 horizons maximum pour la description,
- pour chaque horizon, la texture et la charge en cailloux sont estimées,
- le pourcentage en affleurements rocheux est estimé sur la placette.

Les données de l'IFN ancienne méthode ont été utilisées pour calculer la RUM sur chacune des 100 307 placettes du réseau national à l'aide de fonctions de pédotransferts (θ) développés par Al-Majou selon une méthodologie décrite dans Piedallu et al (2010a).

La formule utilisée pour le calcul est :

$$SWHC^n = (1 - RO) \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left(1 - \sqrt[3]{SC^i} \right) \left(\theta_{2,0}^i - \theta_{4,2}^i \right) T^i \right] \right\}$$

Avec :

SWHC : Soil Water Holding Capacity (RUM)

RO : % en affleurement rocheux

n : nombre d'horizons décrits

SC : % d'éléments grossiers

$\theta_{2,0}$ - $\theta_{4,2}$: teneur en eau volumique entre la capacité au champ et le point de flétrissement pour une texture donnée (mm d'eau / mm de sol)

T_i : épaisseur de l'horizon i, en mm

2.2 Historique et situation actuelle

La notion de réserve utile maximale des sols a d'abord été utilisée pour l'agriculture afin de décrire l'état hydrique des sols (Palmer, 1965), prévoir la productivité et optimiser l'irrigation. Les gestionnaires ont alors eu besoin de cartes pour représenter et spatialiser la donnée.

Or la RUM est une donnée difficile à relever sur le terrain car elle est très variable et nécessite une densité importante de points pour être cartographiée correctement. Le coût de la donnée est alors une limite à la qualité et la précision de la cartographie.

La cartographie prédictive est une technique qui, à partir de relevés ponctuels, permet d'obtenir une cartographie spatialisée et exhaustive pour un paramètre donné. Cette technique a été initiée par J.Franklin (Franklin, 1995) en utilisant la méthode du krigeage pour cartographier les types de végétation. Le krigeage est une méthode d'interpolation qui permet de spatialiser une donnée à partir de relevés ponctuels et d'une estimation basée sur l'espérance mathématique et la variance.

La cartographie prédictive a ensuite été développée en utilisant des covariables, surtout dans la cartographie des sols (McBratney et al, 2003, Scull et al, 2003) ou la répartition des espèces et des habitats (Guisan, Zimmermann, 2000). Pour prédire un paramètre Y, la modélisation statistique cherche à trouver la meilleure fonction telle que :

$Y = f(\text{covariables}) + \text{résidus (écarts non expliqués par la fonction)}$.

Généralement, pour la cartographie prédictive des sols, les covariables utilisées sont topographiques, climatiques ou géologiques. A nombre de points égal, la carte est plus précise avec l'utilisation de covariables que par krigeage.

En France, sous l'impulsion de l'INRA Montpellier, une base de données sur les sols de la région Languedoc-Roussillon a été initiée (Robbez-Masson et al, 2000), en lien avec les travaux de P.Lagacherie. Il existe des exemples de cartographie RUM à haute résolution des sols agricoles à l'échelle d'une région (Cantat et al, 2010) par interpolation. En revanche il n'existe pas encore en France de carte des RUM des sols forestiers à haute résolution à l'échelle d'une région.

2.3 La cartographie de la réserve utile maximale des sols forestiers en France

Actuellement, pour élaborer une cartographie de la RUM, il est nécessaire de réaliser une campagne de terrain. Principalement deux méthodes sont disponibles, basées sur une série d'observations de profils de sol :

- observations par sondage à la pioche, méthode la plus précise mais qui demande beaucoup de temps (fosse de 1m, généralement)
- observations par sondage à la tarière pédologique, plus rapide mais moins précise.

A partir des données issues du réseau Ecoplant (Gegout et al, 2005), la cartographie de la RUM du massif vosgien a été réalisée au pas de 50m (Gegout et al, 2008).

En utilisant le réseau de placettes de l'Inventaire Forestier National (ancienne méthode), la cartographie de la RUM a été réalisée par interpolation au niveau national au pas de 1km avec un $R^2=0,24$ (Piedallu et al., 2010a).

La géologie au 1/1000 000 et les données topographiques climatiques ont ensuite été intégrées comme covariables au modèle statistique pour réaliser une cartographie prédictive de la RUM au pas de 500m avec un $R^2=0,29$, soit un gain de +20% (Piedallu, 2010b).

3 Objectifs du stage

La carte de la RUM au pas de 500m est une donnée très utile à l'échelle nationale pour l'étude des conséquences des changements climatiques sur la forêt française. En revanche, cette donnée est plus difficilement utilisable par le gestionnaire à des échelles plus locales.

L'hypothèse de travail à vérifier est de savoir s'il est possible d'améliorer la résolution et la prédiction des cartographies de RUM et de bilan en eau. La modélisation statistique est alors retenue comme méthode pour améliorer les cartes de RUM. La géologie au 1/50 000 a déjà été utilisée comme covariable avec succès pour la cartographie à haute résolution du pH au pas de 50m pour la Lorraine (Riofrio-Dillon, 2010). Le principe est d'appliquer la même méthode.

Le premier objectif du stage est de réaliser une cartographie à haute résolution (pas de 50m) de la RUM des sols forestiers du Nord-Est de la France en respectant les étapes suivantes :

- Récupération des points de relevés IFN ancienne méthode pour calculer la RUM à partir des données pédologiques et calibrer le modèle,
- Elaboration d'un modèle prédictif $RUM = f(\text{Géologie, topographie, climat})$, avec l'intégration dans le modèle de covariables telles que les cartes géologiques au 1/50 000ème, à la place des cartes au 1/1 000 000ème, les données topographiques issus du modèle numérique de terrain et les données climatiques de Météofrance,
- Interpolation spatiale des résidus (krigeage), c'est-à-dire représentation spatiale au pas de 50m des erreurs de prédictions du modèle calculées sur chaque relevé IFN,
- Intégration des résidus krigés dans la carte des RUM au pas de 50m,
- Validation du modèle à l'aide d'un jeu indépendant de données de RUM à différentes échelles.

Le deuxième objectif est de réaliser une cartographie à haute résolution (pas de 50m) du déficit hydrique estival des sols forestiers du Nord-Est de la France à l'aide de la carte des RUM au pas de 50m. En effet, disposer de la RUM permet de savoir si la capacité de stockage est importante ou non, mais cela ne préjuge pas si la réserve en eau disponible est bonne ou non. Le déficit hydrique estival intègre les précipitations, l'évapotranspiration et la capacité maximale de stockage (RUM). Ce travail est en lien direct avec l'étude en cours de JB Richard sur la « Caractérisation de la contrainte hydrique des sols à l'aide de cartes numériques pour prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans les catalogues de stations forestières des plateaux calcaires de Lorraine, Bourgogne et Champagne-Ardenne ». Il s'inscrit également dans le cadre du RMT AFORCE « Adaptation des forêts au changement climatique ».

Le troisième objectif est de :

- analyser les limites et les améliorations possibles d'une telle étude,
- définir les utilisations possibles des cartes produites pour les gestionnaires forestiers.

Les gestionnaires disposent déjà d'une importante quantité de données disponibles sur SIG : peuplements, stations forestières, précipitations, températures, ETP ... L'objectif est alors de démontrer quel serait l'intérêt d'une carte des RUM et des déficits hydriques estivaux à haute résolution dans la description et la compréhension du comportement des essences, mais également dans l'aide à la décision.

Pour atteindre ces objectifs, il a d'abord fallu mettre au point une méthodologie.

4 Méthode utilisée

4.1 Site étudié

Le site d'étude comprend l'ensemble de la Lorraine, la partie alsacienne du massif vosgien et une partie des plateaux calcaires de Bourgogne. Cette délimitation correspond aux zones sur lesquelles les cartes géologiques au 1/50000ème ont été acquises auprès du BRGM.

La partie Ouest est constituée des plaines sédimentaires du Bassin parisien et la partie Est du massif vosgien, culminant à 1425m. La zone ainsi constituée représente 43 000 km², couvrant intégralement les 4 départements de la Lorraine (Meurthe-et-Moselle, Meuse, Moselle, Vosges), et partiellement la Champagne-Ardenne (Ardennes, Marne, Haute-Marne, Aube), la Bourgogne (Côte d'Or), la Franche-Comté (Haute-Saône, Territoire de Belfort) et l'Alsace (Bas-Rhin, Haut-Rhin).

Nous disposons pour l'ensemble de la zone d'étude des cartes géologiques au 1/50000ème et d'un nombre important de données climatiques ou topographiques de la base DIGITALIS du Lerfob.

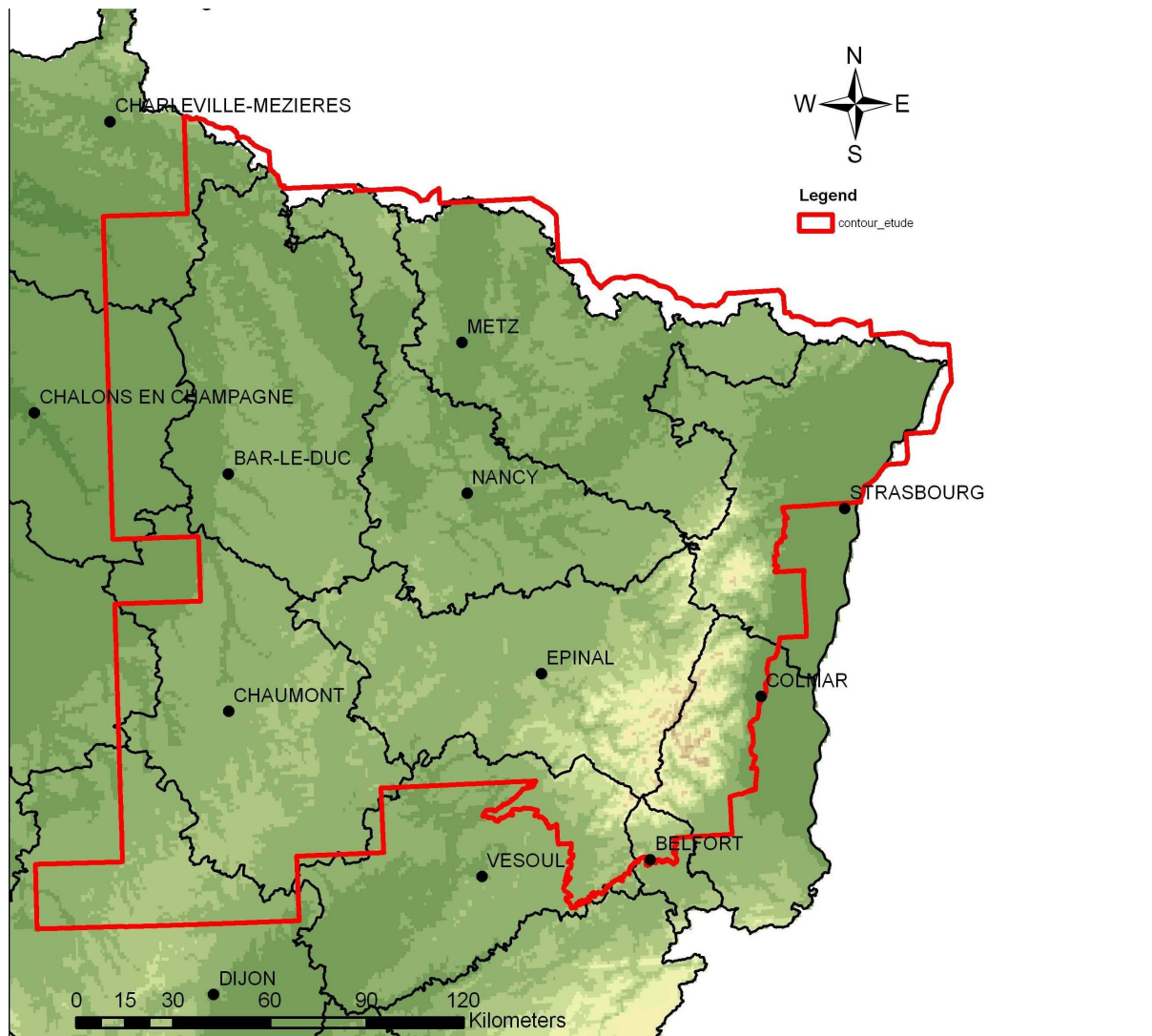


Figure 2 : Contour de la zone d'étude

4.2 Méthodologie générale

Le réseau des 100 307 placettes IFN nationales constitue une base de données très précieuse car les paramètres nécessaires pour le calcul des RUM sont disponibles (Drapier et al, 2001). La méthode utilisée pour calculer la RUM est définie dans Piedallu et al, 2010a. Les 15 369 points de relevés IFN extraits sur la zone d'étude ont ainsi permis de calibrer le modèle.

Pour réaliser la cartographie prédictive, les variables explicatives ont été retenues sur la base du modèle « SCORPAN » (McBratney et al, 2003) :

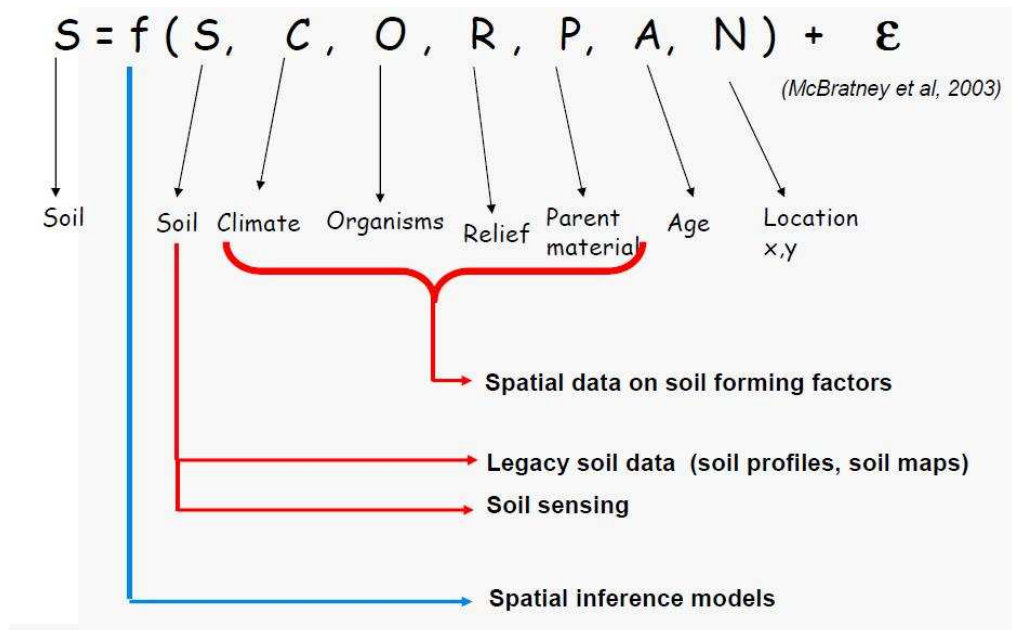


Figure 3 : Modèle SCORPAN

S (soil) : propriétés du sol disponibles sur ce même point et extrapolables sur l'ensemble de la zone (ex : pH).

C (climat) : Il s'agit par exemple de prendre en compte l'effet des eaux de pluie sur la dissolution du calcaire, ou l'effet du gel sur la gélifraction des roches.

O (organismes) : l'activité des organismes vivants (végétaux/animaux) joue un rôle sur l'altération des roches.

R (relief) : Selon la position topographique (pente, concavité, position sur le versant, ...), la valeur de la RUM peut varier sensiblement :

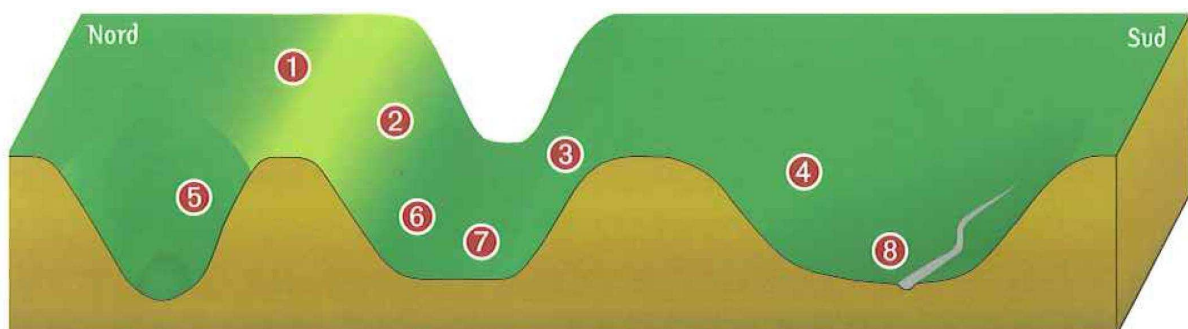


Figure 4 : Exemple de profil topographique (extrait du catalogue des stations forestières des plateaux calcaires de Champagne-Ardenne, du Nord et de l'Est de la Bourgogne)

Ainsi, pour les valeurs de RUM, les positions topographiques 5 à 8 (voir figure 4) sont plus favorables que les positions 1 à 4. L'effet de la topographie est également susceptible de varier en fonction de la région naturelle (ex : Plateau calcaire, Vosges, Plateau Lorrain, ...)

P (parent material) : La géologie est la variable qui, potentiellement, est susceptible de contribuer le plus à la calibration du modèle. Par exemple, un calcaire dur aura une RUM plus

faible qu'une marne meuble, à cause de la profondeur prospectable mais aussi à cause de la charge en cailloux plus importante.

A (âge) : critère en lien avec la pédogénèse, influe l'épaisseur de sol et donc sur la RUM.

N (localisation) : selon les régions naturelles, les processus pédogénétiques ne vont pas se dérouler de la même manière.

Le logiciel de statistiques S-plus a été utilisé pour la modélisation à l'aide de macros. Pour la spatialisation, c'est le logiciel ArgGis qui a été utilisé en association avec Arcinfo.

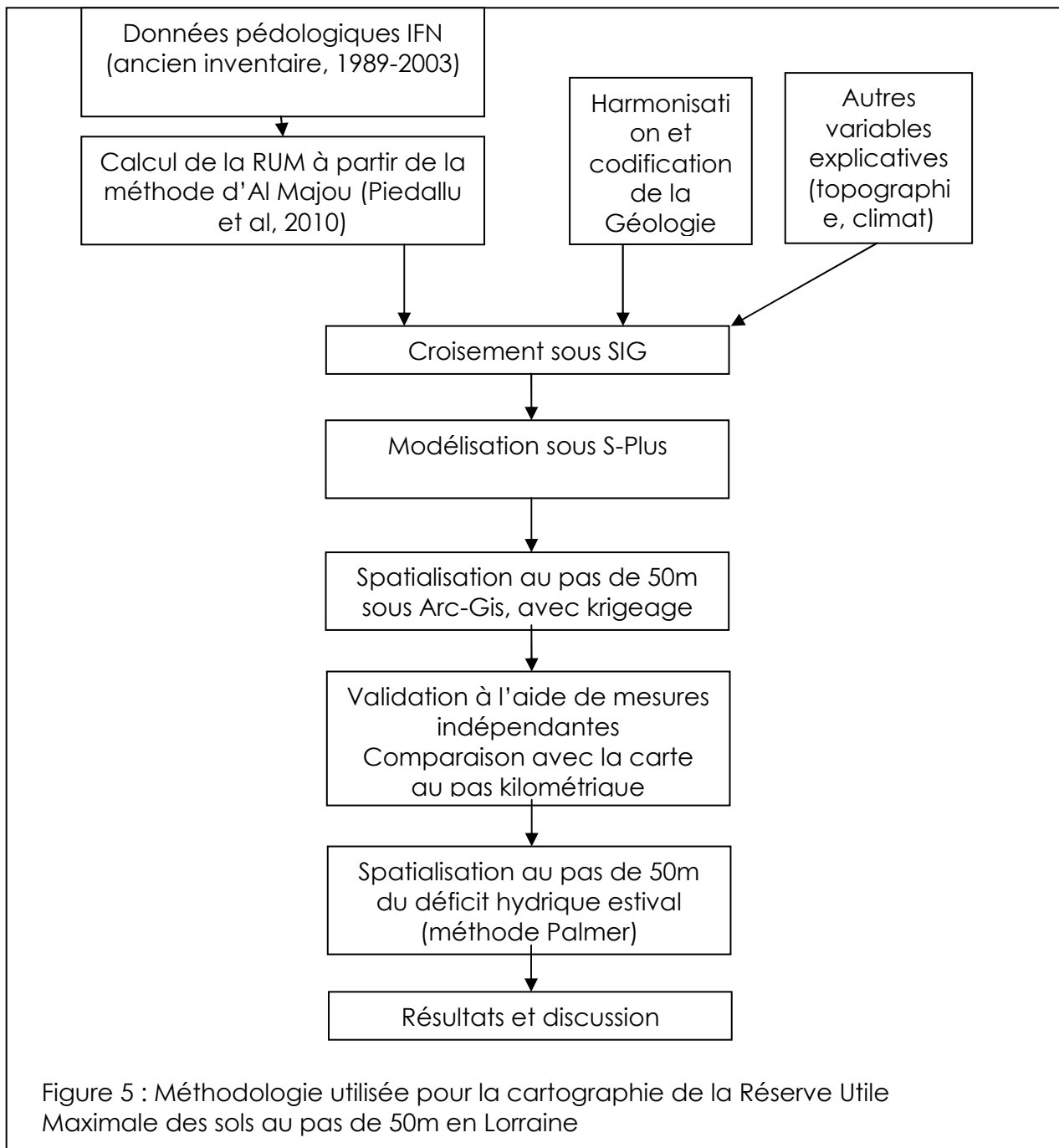
La validation du modèle à l'échelle de la zone d'étude a été réalisée avec un jeu de données IFN indépendantes (ancienne méthode).

La validation du modèle à l'échelle locale a été réalisée avec :

- les données des forêts du massif de Bure (55), à l'échelle d'un massif,
- les données du site de Bois l'Evêque - Villey le sec (54), à l'échelle de la forêt (maillage de 250m), d'un groupe de parcelles (maillage de 100m) et d'une parcelle (maillage de 50m).

Pour les données du site de Bois l'Evêque – Villey le sec, un inventaire auquel j'ai participé a été réalisé de la mi-mai jusqu'à la fin juin 2011. Le protocole utilisé correspond à celui de la base de données Ecoplant. Les données floristiques, pédologiques et dendrométriques ont été relevées sur 165 placettes. En ce qui nous concerne, le protocole de relevé des données pédologiques est compatible avec le protocole IFN. Les relevés sont donc utilisables pour la validation de la carte des RUM aux échelles inférieures à la forêt.

La méthodologie générale peut être résumée dans le schéma ci-dessous :



4.3 Données utilisées

4.3.1 Données IFN : méthode de calcul de la RUM à partir d'Al Majou (FPT)

L'étude des fonctions de pédotransfert disponibles pour la France réalisée en 2010 (Piedallu et al, 2010a) a comparé différentes classes de pédotransfert (Jamagne, Bruand-2002, Bruand-2004, Al-Majou, Schaap, Wosten). Parmi toutes ces méthodes, c'est la méthode d'Al Majou qui a été jugée la meilleure pour calculer la RUM et qui a été utilisée pour estimer la RUM sur

chacun des 15 369 points IFN à partir des données pédologiques disponibles. La fonction de pédotransfert permet d'établir un lien entre la classe de texture et teneur en eau volumique (mm d'eau / mm de sol).

4.3.2 Données géologiques

4.3.2.1 Principe général pour l'harmonisation de la géologie

Nous avons utilisé 84 cartes géologiques du BRGM disponibles sur la zone d'étude. Du fait des différences de nomenclature utilisées entre ces différentes cartes, il est nécessaire de les harmoniser. De ce fait, j'ai harmonisé les différentes nomenclatures des cartes disponibles.

Chacune des 84 cartes disponibles possède sa propre codification, ce qui génère 3020 codes dont une bonne partie est redondante. L'objectif de l'harmonisation des couches géologiques est de donner le même nom à toutes les couches géologiques identiques quant à la description dans la notice de la carte géologique.

Une fois l'harmonisation terminée, le nombre de codes est passé de 3020 codes initiaux (appelés code_ini) à 377 codes harmonisés de premier niveau (appelés codes HR1, Harmonisation géologique pour le modèle de Rum 1er niveau).

Une deuxième harmonisation est alors nécessaire afin de réduire le nombre de codes. Les unités faiblement représentées sont agrégées à d'autres unités avec une RUM similaire et mieux représentées. Cette deuxième harmonisation a permis d'obtenir 159 codes dits HR2 (2ème niveau).

Le nombre de codes a encore été réduit une troisième fois afin d'obtenir un nombre de classes compatible avec les besoins en terme de modélisation. A l'aide d'une modélisation statistique entre les RUM des relevés IFN et les 159 codes géologiques HR2, un regroupement des unités ayant des coefficients proches a été réalisé. Ainsi, 31 codes géologiques HR3 (3ème niveau) ont finalement été retenus (Table 1 et Figure 6).

Géologie : 3ème Harmonisation	Nombre de placettes IFN	Moyenne de RUM	Ecart type de RUM
alluvions et colluvions assez meuble	575	93.0	31.7
alluvions et colluvions meuble	187	101.7	33.3
alluvions et colluvions tres meuble	310	112.8	29.2
argile et marne meuble	469	113.2	20.7
argile et marne tres meuble	274	123.8	21.0
calcaire a oolithe-polypier dur	588	40.4	23.3
calcaire a oolithe-polypier massif	320	32.8	20.7
calcaire a oolithe-polypier tres dur	1029	35.9	22.1
calcaire comblanchien massif	156	30.1	20.9
calcaire et marne assez dur	802	69.7	36.0
calcaire marneux a oolithe-polypier dur	890	45.4	28.9
calcaire marneux et calcaire a ceratites et entroques dur	374	48.0	30.2
cone de dejection et colluvions assez dur	94	75.9	29.4
formation glaciaire, eboulis	291	58.1	38.4
gneiss et schistes assez dur	203	72.0	35.4
gneiss, schistes et breches dur	302	49.8	30.7
gneiss, schistes et breches tres dur	132	32.2	20.5
granite et autre roche grenue assez dur	396	66.2	33.7
granite et autre roche grenue dur	702	47.9	30.8
granite et autre roche grenue tres dur	360	36.3	24.9
gres assez dur	1119	77.4	35.2
gres assez meuble	903	99.9	32.5
gres dur	1724	56.0	27.2
limons de plateau meuble	244	105.5	26.8
limons de plateau tres meuble	544	122.0	19.5
marne calcaire et argile assez meuble	1196	100.3	27.6
roche sedimentaire detritique dur	467	55.2	33.9
roche volcanique et tuf assez dur	161	65.7	32.4
roche volcanique et tuf dur	300	50.9	32.8
sable assez meuble	145	99.3	28.2
sable meuble	112	119.7	26.4
Total sites	15369		

Tableau 1 : RUM moyenne et écart type pour les 31 unités géologiques utilisées

L'écart type de la RUM par unité géologique est élevé (de l'ordre de 29mm pour une RUM moyenne de 72mm par unité. En effet, pour un substrat donné, les valeurs de RUM peuvent être très hétérogènes.

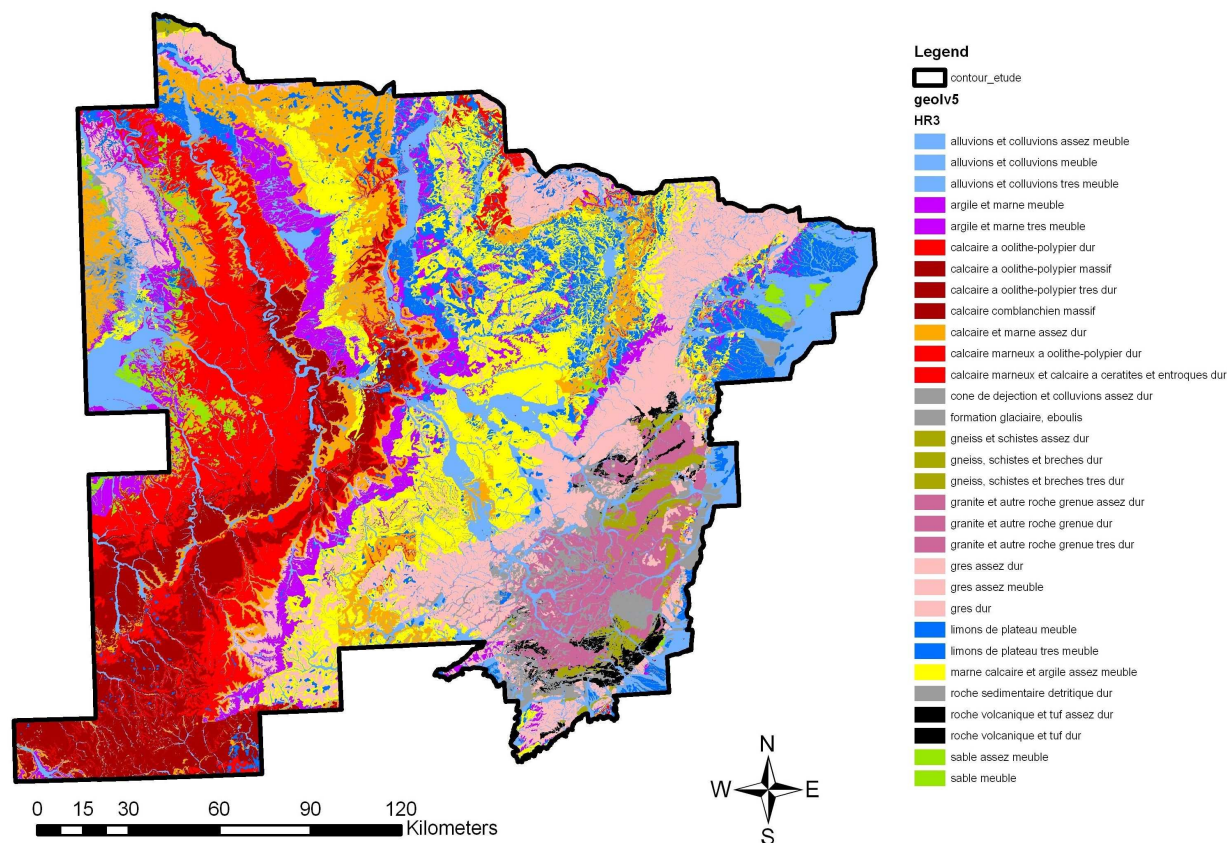


Figure 6 : Carte géologique simplifiée en 31

4.3.2.2 Précisions sur la méthodologie mise en place pour l'harmonisation de la géologie

L'exercice d'harmonisation de la géologie est particulièrement difficile pour des zones homogènes comme les plateaux calcaires. En effet, les transitions entre marnes, calcaires tendres et calcaires durs sont souvent très progressives et amènent à générer assez fréquemment des imprécisions.

Des étudiants de l'université de Nancy ont saisi puis harmoniser 12 cartes géologiques correspondant aux plateaux calcaires bourguignons. Lors du contrôle de la qualité de l'harmonisation, la méthode utilisée initialement a montré ses limites en générant parfois des écarts importants d'une carte à l'autre. La difficulté pour harmoniser les cartes géologiques m'a amené à comparer deux méthodes d'harmonisation de la géologie :

- la méthode d'harmonisation de proche en proche, utilisée par les étudiants,
- la méthode d'analyses multicartes, mise au point lors du stage.

Description de la méthode d'harmonisation de proche en proche :

Chaque carte géologique présente sa propre codification et ses propres libellés. L'harmonisation des codes et libellés se base sur des couches géologiques prises comme référence sur l'ensemble de la zone d'étude. A chaque fois qu'une description dans la notice géologique correspond à cette couche géologique de référence, le code et le libellé sont repris. Ainsi, chaque code et libellé géologique harmonisé est censé faire référence à un même code

et libellé unique à l'échelle de la zone d'étude. S'il s'agit d'un nouveau code pas encore rencontré, ce nouveau code est alors intégré à la base et servira à son tour comme référence.

Description de la méthode d'harmonisation d'analyses multicartes :

Le code harmonisé est standardisé en amont précisant systématiquement l'étage géologique, le ou les type(s) de roche dominantes et enfin la dureté issue de l'analyse des valeurs de RUM. Exemple de code harmonisé : Bajocien – calcaire oolithique – tres dur.

L'étage et le type de roche sont donnés à partir de la notice de carte géologique. La dureté est donnée à partir de 3 éléments :

- la notice de la carte géologique,
- le log stratigraphique (Voir annexe 1 : log stratigraphique de la Lorraine),
- les moyennes de RUM lorsqu'elles sont significatives.

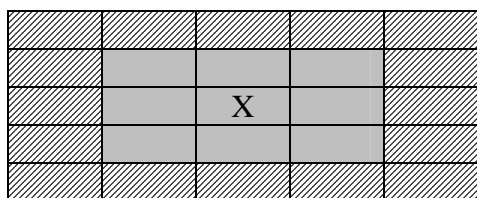
Afin de standardiser la dureté, les valeurs suivantes ont été retenues pour la correspondance :

Moyenne significative de RUM observée (en mm)	Dureté
0-40	Tres dur
40-60	Dur
60-80	Assez dur
80-100	Assez meuble
100-120	Meuble
120-140	Tres meuble

Tableau 2 : Correspondance de dureté en lien avec la RUM

Un croisement sous SIG permet d'affecter un code géologique « brut » (code_ini) et une valeur de RUM à chaque pont de relevé IFN. A l'aide de filtres sous excel, chaque carte est ainsi analysée pour attribuer une dureté (en lien avec la moyenne de la RUM) pour chaque unité géologique.

Lors de l'analyse d'une carte (indiquée d'un « X » dans le schéma ci-dessous), la moyenne de RUM n'est utilisée pour une unité donnée que si elle contient plus de 10 valeurs. Sinon, ce sont les 9 cartes (en grisé sur le schéma ci-dessous) formant le carré autour de la carte qui sont utilisés. A défaut, ce sont les 16 cartes (en grisé ou hachuré) qui sont utilisées. En dernier lieu, c'est l'ensemble de la zone d'étude qui est concerné.



Ce protocole a pour but de mettre une indication sur la dureté de la roche uniquement lorsque le nombre de valeurs est significatif, c'est-à-dire supérieur à 10.

Eventuellement, lorsqu'un terme spécifique existe (ex : argiles du Gault, calcaire à gryphées, ...), alors celui-ci est rajouté au type de roche car il permet de distinguer et retrouver plus facilement les couches.

Avantages / inconvénients des deux méthodes :

Méthode d'harmonisation	Avantages	Inconvénients
Proche en proche	<ul style="list-style-type: none"> - plus rapide car ne nécessite pas d'analyse fine entre les différentes cartes et données de RUM - facile à mettre en œuvre sur une petite zone ou sur une zone assez bien marquée au niveau géologique (ex : plateau lorrain) 	<ul style="list-style-type: none"> - risque de cumul d'erreur d'une carte à l'autre, surtout dans les zones homogènes ou les vastes zones d'étude - difficulté pour déceler la variabilité et les transitions dans les zones géologiques homogènes (ex : plateau calcaire) - le code harmonisé figurant déjà dans la liste de codes, ceux-ci sont parfois peu explicites, pouvant entraîner des confusions
Analyses multicartes	<ul style="list-style-type: none"> - permet de mieux déceler la variabilité et les transitions dans les zones géologiques homogènes ou dans les vastes zones d'étude - pas de cumul d'erreur possible d'une carte à l'autre - le libellé du code est cadré à l'avance pour être systématique 	<ul style="list-style-type: none"> - méthode assez longue à mettre en œuvre

Figure 7 : Avantages / inconvénients des deux méthodes d'harmonisation de la géologie

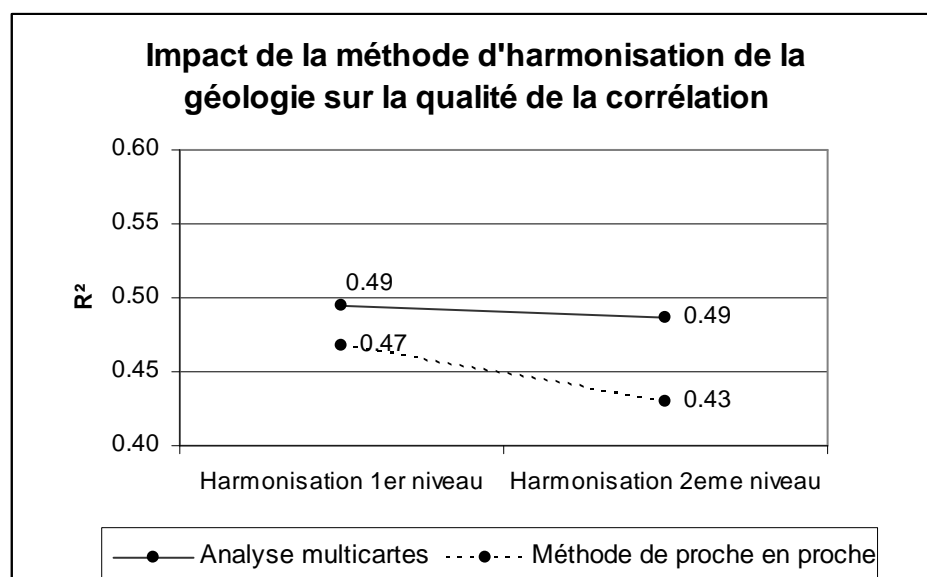


Figure 8 : Impact de la méthode d'harmonisation de la géologie sur la qualité de la corrélation

On pourrait donc estimer que la méthode par analyses multicartes permettrait d'améliorer le R^2 de 0,05 au moment de l'harmonisation finale (3^{ème} niveau).

L'harmonisation de la géologie doit avant tout s'appuyer sur une bonne connaissance des notices géologiques pour être sûr que les différences de duretés observées d'après les RUM correspondent bien à des différences de couches géologiques.

Analyse critique de la méthode d'harmonisation par analyses multicartes :

Cette analyse repose sur le retour d'expérience sur les plateaux calcaires.

Le fait de donner trop d'importance à la variation des RUM observées pour caractériser la dureté des types de roches a un inconvénient important : des effets « cartes » sont générés en voulant se caler trop finement sur les moyennes de RUM observées par carte ou groupe de cartes. Il en résulte des limites rectilignes entre cartes ne correspondant pas généralement à une réalité observée.

Pour corriger cet inconvénient, à la fin de l'harmonisation de toute la zone, l'ensemble des couches a été revu par étage géologique pour harmoniser les codes de duretés afin de :

- éviter les variations locales trop importantes ne correspondant pas forcément à une différence géologique,
- limiter les effets « cartes ».

Méthode d'harmonisation retenue pour la géologie sur l'ensemble de la zone d'étude :

Au final, c'est la méthode par analyses multicartes qui a été retenue pour harmoniser l'ensemble de la zone d'étude. Avec le recul, même si cette méthode a très bien marché pour le plateau calcaire, elle aurait pu ne pas être utilisée pour le plateau lorrain. En effet, les couches géologiques y sont très homogènes et facilement différenciées (peu de problème de transition entre cartes).

La codification déjà réalisée pour le massif vosgien a été complétée pour caractériser chaque unité sous une forme commune : étage géologique + type de roche dominant + dureté

4.3.3 Données topographiques et hydrologiques

La liste générale des données utilisées est répertoriée dans la table 3, à la fin du §4.3.4.

Un nombre important de variables ont déjà été calculées lors de précédentes études afin de caractériser la topographie et l'écoulement en eau en Lorraine (Piedallu et al., 2006; Piedallu et Gegout, 2008; Riofrio-Dillon, 2010). Ces données sont dérivées du modèle numérique de terrain (MNT). Pour un même type de variable, il existe différentes emprises. Par exemple, pour la pente, on peut utiliser slope 50, 150, 250, 500, 1000, 1500 et 2000. Le nombre associé correspond à la largeur en mètres du pixel. Slope 150 est un carré de 3 pixels de 50m de côté correspondant à la valeur moyenne de la pente sur 9 pixels.

Généralement, des cercles de 3, 5, 10, 15, 25, 35 et 50 pixels de rayon sont utilisés pour créer de nouvelles variables. Ces nouvelles variables sont alors la moyenne de la pente de chacun des pixels de 50m alentours.

Dès que possible, des variables continues ont été utilisées (ex : pente, convexité, ...). En effet, ce type de variable est plus facile à intégrer dans un modèle que des variables par classe (ex :

position topographique) car il est alors nécessaire de constituer des classes. Une part du pouvoir explicatif est alors perdue.

Concernant la pente, le logarithme a été utilisé pour disperser le nuage de points et mieux analyser l'effet de la pente. En effet, une très grande majorité des points de relevés sont situés sur des faibles pentes et la faible dispersion diminue le pouvoir explicatif. En réalité, c'est LOG (1+ pente) qui est utilisé car le logarithme n'existe pas pour les valeurs nulles de pente.

Pour extraire ces données sur les points de relevés IFN, un croisement entre les données raster existantes et les placettes géoréférencées de l'IFN a dû être réalisé avec une macro utilisée avec Arcinfo.

Il n'y a pas eu de comparaison faite entre la variable de topographie locale de l'IFN et les variables topographiques disponibles à partir du MNT.

4.3.4 Données climatiques

Les variables climatiques les plus susceptibles d'avoir une influence sur la RUM ont également été testées. Elles proviennent de la base de données Digitalis existant au Lerfob et ont principalement été créées par C.Piedallu. La liste de ces indices est répertoriée dans la table 3.

Les données climatiques ont été regroupées par saison plutôt que par mois pour éviter que, sous l'effet du hasard, certaines variables rentrent dans le modèle de façon significative mais aléatoire.

Variable	Description	type
HR2	Geologie harmonisée, 2ème niveau	Geologique
HR3	Geologie harmonisée, 3ème niveau	Geologique
alti	Altitude, 50m. Resolution	Topographique
conf10	Indice de confinement (10 pixels*50m cote)	Topographique
conf20	Indice de confinement (20 pixels*50m cote)	Topographique
conf30	Indice de confinement (30 pixels*50m cote)	Topographique
conf40	Indice de confinement (40 pixels*50m cote)	Topographique
conf50	Indice de confinement (50 pixels*50m cote)	Topographique
conf100	Indice de confinement (100 pixels*50m cote)	Topographique
cosexpo	Cosinus exposition, 50m. Resolution	Topographique
cosexpo150	Cosinus exposition, 150m. Resolution	Topographique
cosexpo250	Cosinus exposition, 250m. Resolution	Topographique
cosexpo500	Cosinus exposition, 500m. Resolution	Topographique
cosexpo1000	Cosinus exposition, 1000m. Resolution	Topographique
cosexpo1500	Cosinus exposition, 1500m. Resolution	Topographique
cosexpo2000	Cosinus exposition, 2000m. Resolution	Topographique
cosexpo5000	Cosinus exposition, 5000m. Resolution	Topographique
cosexpo10000	Cosinus exposition, 10000m. Resolution	Topographique
cosexpo20000	Cosinus exposition, 20000m. Resolution	Topographique
curv_a3	Indice de courbure, (3 pixels*50m cote)	Topographique
curv_a5	Indice de courbure, (5 pixels*50m cote)	Topographique
curv_a10	Indice de courbure, (10 pixels*50m cote)	Topographique
curv_a20	Indice de courbure, (20 pixels*50m cote)	Topographique
curv_a30	Indice de courbure, (30 pixels*50m cote)	Topographique
curv50	Indice de courbure, (50 pixels*50m cote)	Topographique
discr	Distance à la crête	Topographique
distal	Distance au talweg	Topographique
ipv	Indice de position sur le versant (distal/(discr + distal))	Topographique
id10	Indice de dénivelé (10 pixels*50m cote)	Topographique
id30	Indice de dénivelé (30 pixels*50m cote)	Topographique
id50	Indice de dénivelé (50 pixels*50m cote)	Topographique
idr15	Indice de dénivelé relatif (15 pixels*50m cote)	Topographique
idr30	Indice de dénivelé relatif (30 pixels*50m cote)	Topographique
idr50	Indice de dénivelé relatif (50 pixels*50m cote)	Topographique
igr10	Indice de granulosité - caractère montagnard (10 pixels*50m cote)	Topographique
slope50	Pente, 50m resolution	Topographique
slope150	Pente, 150m resolution	Topographique
slope250	Pente, 250m resolution	Topographique
slope500	Pente, 500m resolution	Topographique
slope1000	Pente, 1000m resolution	Topographique
slope1500	Pente, 1500m resolution	Topographique
slope2000	Pente, 2000m resolution	Topographique
moore_pl	Indice de Moore incluant les précipitations	Hydrologique
moore50	Indice de Moore	Hydrologique
flac_fr	Flux accumulation raster : nombre de cellules drainantes	Hydrologique

Variable	Description	type
flacc_gr13	Flux accumulation raster : nombre de cellules drainantes	Hydrologique
flacc_sl	Flux accumulation raster : nombre de cellules drainantes	Hydrologique
flacc_slpl	Flux accumulation raster : nombre de cellules drainantes	Hydrologique
spi	Indice de puissance du courant / indique la puissance erosive	Hydrologique
cit	Indice de puissance du courant / indique la puissance erosive	Hydrologique
ls	Indice de puissance du courant / indique la puissance erosive	Hydrologique
zalluv_2_50	Zones alluviales situées à moins de x mètres d'un cours d'eau	Hydrologique
zalluv_4_50	Zones alluviales situées à moins de x mètres d'un cours d'eau	Hydrologique
zalluvx4_8_50	Zones alluviales situées à moins de x mètres d'un cours d'eau	Hydrologique
cn	Rapport C/N	Nutritionnel
ph	Indication pH	Nutritionnel
amplip	Amplitude précipitations moyennes	Climatique
amplit	Amplitude températures moyennes	Climatique
nbgel	Nombre annuel de jours de gelée	Climatique
etp13	Evapotranspiration annuelle	Climatique
etpaut	Evapotranspiration automne	Climatique
etpete	Evapotranspiration été	Climatique
etphiv	Evapotranspiration hiver	Climatique
etpptp	Evapotranspiration printemps	Climatique
prec13	Précipitations annuelles	Climatique
precaut	Précipitations automne	Climatique
precete	Précipitations été	Climatique
prechiv	Précipitations hiver	Climatique
precptp	Précipitations printemps	Climatique
rad13	Radiations annuelles	Climatique
radaut	Radiations automne	Climatique
radete	Radiations été	Climatique
radhiv	Radiations hiver	Climatique
radptp	Radiations printemps	Climatique
temp13	Températures annuelles	Climatique
tempaut	Températures automne	Climatique
tempete	Températures été	Climatique
temphiv	Températures hiver	Climatique
tempptp	Températures printemps	Climatique

Tableau 3 : Liste des variables explicatives utilisées afin de modéliser la RUM

4.4 Méthodologie utilisée pour modéliser la RUM

Un programme existant au Lerfob et fonctionnant sous S-plus a été utilisé pour modéliser la RUM. Il s'agit de tester automatiquement et pas à pas chacune des variables candidates en fonction des variables préexistantes dans le modèle. Les termes simples, quadratiques et cubiques ont été évalués pour chaque variable. Le programme a été exécuté de façon incrémentale pour la sélection de chacune des variables, jusqu'à ce qu'aucune d'entre elles ne soit statistiquement significative ($p > 0.001$), ou que le gain de R^2 apporté soit très faible. A chaque étape, les corrélations avec les autres variables du modèle, ainsi que la pertinence du

choix au regard des connaissances concernant le déterminisme de la RUM, ont été examinés, et sont entrés en compte dans le choix de la variable.

La modélisation est une méthode statistique permettant la réalisation de cartes quand elle est couplée à l'utilisation de variables spatialisées. Elle nécessite cependant d'être rigoureux tout au long de la démarche :

- il est nécessaire d'utiliser des variables ayant une pertinence au regard du déterminisme de la RUM. Les variables pouvant influencer la RUM concernent soit le substrat ou le sol, soit la topographie ou le climat et vont jouer sur la texture et la profondeur de sol.
- il est important de déceler l'effet aléatoire d'un paramètre qui peut entrer dans le modèle du fait du hasard. En effet, plus on considère de variables et plus il est possible qu'un paramètre soit bien corrélé de façon aléatoire à la RUM. Pour limiter cet effet nous avons utilisé des données trimestrielles pour les variables climatiques à la place de variables mensuelles

La méthodologie étant maintenant calée, il est intéressant de voir si les résultats permettent d'améliorer la qualité prédictive de la carte de la RUM au pas de 500m.

5 Modélisation et cartographie de la réserve utile maximale des sols forestiers

5.1 Résultats de la modélisation

Pour modéliser la RUM à partir des relevés IFN, 4 variables ont été retenues :

- la géologie, simplifiée en 31 classes,
- la pente moyenne sur un pixel de 150m (le logarithme est utilisé en terme quadratique),
- la pente moyenne sur un pixel de 1500m (le logarithme est utilisé en terme quadratique),
- la forme du relief (curvature sur un pixel de 250m).

Une interaction avec le type de roche, appelé zone, a été rajoutée. En effet, selon que le relevé se situe sur calcaire ou sur argile, l'effet de la pente ne va pas être le même.

L'équation du modèle est la suivante :

$$RUM = 87.9639 + [geol_HR3] + coef_slope150_1(zone) * LOG(1 + [slope150]) + coef_slope150_2(zone) * LOG^2(1 + [slope150]) + coef_slope1500_1(zone) * LOG(1 + [slope1500]) + coef_slope1500_2(zone) * LOG^2(1 + [slope1500]) - 14.6266 * [curv_a5]$$

Les coefficients de la pente varient en fonction de la zone :

	Zone argileuse	Zone marneuse	Zone calcaire	Zone cristalline	Zone gréseuse
Coef_slope150_1	6.5693	14.8987	-34.4770	-0.2849	-51.4393
Coef_slope150_2	-20.7244	-29.7687	9.8113	-16.6044	11.7684
Coef_slope1500_1	47.8333	51.5110	-25.9111	-127.1782	49.6798
Coef_slope1500_2	-44.9454	-48.3343	8.3552	43.6001	-40.7722

Tableau 4 : valeurs des coefficients de la pente, en fonction de la zone saisie

Le R² de ce modèle de RUM s'établit sur le jeu de calibration à 0.53 et la RMSE (Root Mean Square Error) à 19.

value	coef	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	87.9639	2.4435	35.9987	0.0000
geolalluvions et colluvions meuble	11.8580	2.4946	4.7535	0.0000
geolalluvions et colluvions tres meuble	15.6143	5.8365	2.6753	0.0075
geolargile et marne meuble	17.4127	5.5738	3.1240	0.0018
geolargile et marne tres meuble	29.3800	6.1188	4.8016	0.0000
geolcalcaire a oolithe-polypier dur	-13.2201	7.7493	-1.7060	0.0880
geolcalcaire a oolithe-polypier massif	-22.1660	7.8255	-2.8325	0.0046
geolcalcaire a oolithe-polypier tres dur	-18.2735	7.7692	-2.3520	0.0187
geolcalcaire comblanchien massif	-26.7418	7.9603	-3.3594	0.0008
geolcalcaire et marne assez dur	16.7433	7.7680	2.1554	0.0311
geolcalcaire marneux a oolithe-polypier dur	-7.2990	7.8366	-0.9314	0.3517
geolcalcaire marneux et calcaire a ceratites et entroques dur	-3.4702	7.8387	-0.4427	0.6580
geolcone de dejection et colluvions assez dur	7.9433	5.4588	1.4551	0.1457
geolformation glaciaire, eboulis, cone de dejection	71.9811	13.6077	5.2897	0.0000
geolgneiss et schistes assez dur	94.2173	13.9806	6.7392	0.0000
geolgneiss, schistes et breches dur	80.0014	13.9704	5.7265	0.0000
geolgneiss, schistes et breches tres dur	64.5519	14.1874	4.5500	0.0000
geolgranite et autre roche grenue assez dur	92.4069	14.1001	6.5536	0.0000
geolgranite et autre roche grenue dur	76.2505	14.0517	5.4264	0.0000
geolgranite et autre roche grenue tres dur	64.2004	14.1107	4.5498	0.0000
geolgres assez dur	16.3694	5.7736	2.8352	0.0046
geolgres assez meuble	11.5050	1.6481	6.9807	0.0000
geolgres dur	8.8251	5.8886	1.4987	0.1340
geollimons de plateau meuble	7.0519	2.2065	3.1960	0.0014
geollimons de plateau tres meuble	25.0443	5.9176	4.2322	0.0000
geolmarne calcaire et argile assez meuble	5.3068	1.5585	3.4051	0.0007
geolroche sedimentaire detritique dur	13.3258	5.8847	2.2645	0.0236
geolroche volcanique et tuf assez dur	89.2532	14.1759	6.2961	0.0000
geolroche volcanique et tuf dur	81.1148	14.0098	5.7899	0.0000
geolsable assez meuble	2.4931	2.6022	0.9581	0.3380
geolsable meuble	22.2902	6.4234	3.4701	0.0005
curv.a5	-14.6266	1.8323	-7.9827	0.0000
LOGslope150zonezargile	6.5693	13.3479	0.4922	0.6226
LOGslope150zonezcalcaire	-34.4770	9.3024	-3.7063	0.0002
LOGslope150zonezcristalline	-0.2849	20.3132	-0.0140	0.9888
LOGslope150zonezgres	-51.4393	11.9985	-4.2872	0.0000
LOGslope150zonezmarne	14.8987	9.2933	1.6032	0.1089
zonezargileI(LOGslope150^2)	-20.7244	11.2348	-1.8447	0.0651
zonezcalcaireI(LOGslope150^2)	9.8113	6.0057	1.6337	0.1023
zonezcristallineI(LOGslope150^2)	-16.6044	9.1563	-1.8134	0.0698
zonezgresI(LOGslope150^2)	11.7684	6.0432	1.9474	0.0515
zonezmarneI(LOGslope150^2)	-29.7687	6.4892	-4.5874	0.0000
zonezargileLOGslope1500	47.8333	21.2072	2.2555	0.0241
zonezcalcaireLOGslope1500	-25.9111	21.9814	-1.1788	0.2385
zonezcristallineLOGslope1500	-127.1782	30.0049	-4.2386	0.0000
zonezgresLOGslope1500	49.6798	16.0227	3.1006	0.0019
zonezmarneLOGslope1500	51.5110	11.4631	4.4936	0.0000
zonezargileI(LOGslope1500^2)	-44.9454	17.9446	-2.5047	0.0123
zonezcalcaireI(LOGslope1500^2)	8.3552	14.9150	0.5602	0.5754
zonezcristallineI(LOGslope1500^2)	43.6001	13.6933	3.1840	0.0015
zonezgresI(LOGslope1500^2)	-40.7722	8.2111	-4.9655	0.0000
zonezmarneI(LOGslope1500^2)	-48.3343	8.1122	-5.9583	0.0000

Tableau 5 : Coefficients, erreur standard, t et p value des variables du modèle de RUM

Les coefficients des différentes unités géologiques pondèrent positivement ou négativement la constante « Intercept » (87,96). Ainsi on peut estimer l'effet de chaque unité géologique sur la RUM. Plus le coefficient est élevé et plus la roche est meuble et donc plus la RUM est forte. On constate ainsi que les calcaires de comblanchien sont les roches les plus dures de la zone, à position topographique égale. Les roches cristallines apparaissent avec un coefficient élevé car elles sont ensuite compensées négativement par la pente au pas de 1500 mètres.

La relation entre la RUM et la pente montre qu'à géologie égale, plus la pente est forte et plus la RUM est faible.

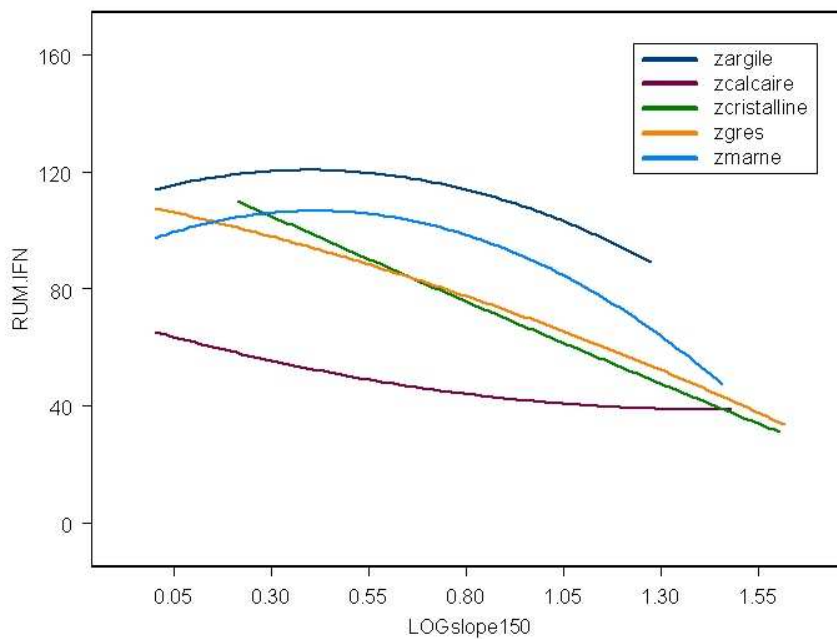


Figure 9 : Relation entre la RUM et la pente locale (pixel de 150m, expression logarithmique) en fonction du type de roche

Pour les zones marneuses et argileuses, on constate qu'une pente doit être supérieure à 6-8% environ pour qu'elle ait un impact sur la RUM. Pour les autres types de roche, au contraire, la pente a un effet immédiat, même pour des faibles pentes.

Dans les zones argileuses et marneuses, même avec un départ de matériau superficiel à cause de la pente, le sol reste profond et meuble du fait de la nature meuble du matériau parental. Dans les zones calcaires, gresseuses ou cristallines, l'existence d'un socle explique la faiblesse des niveaux de RUM avec le départ de matériau superficiel sous l'effet de la pente.

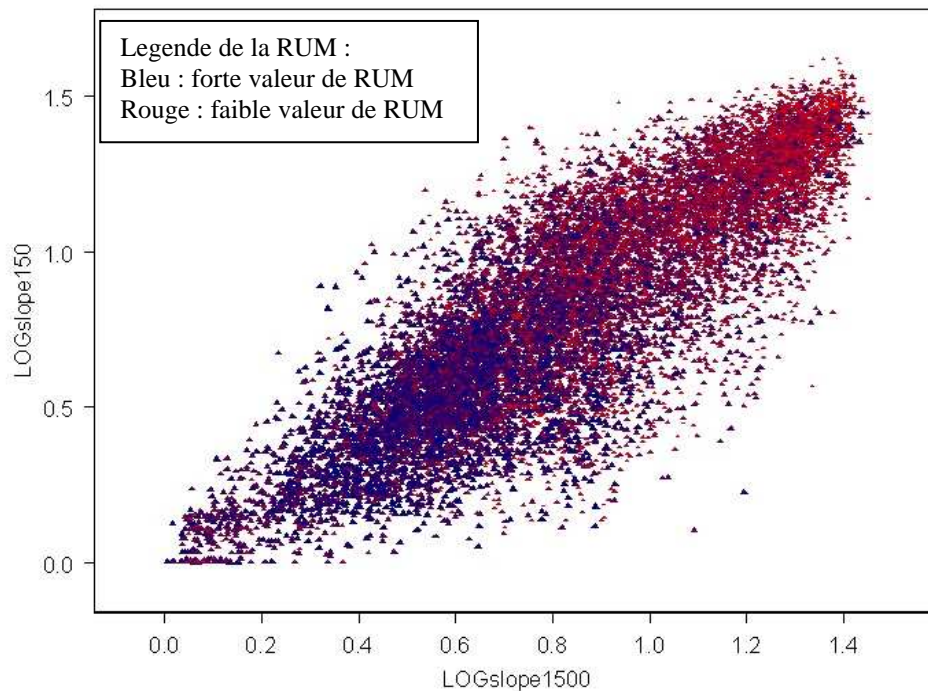


Figure 10 : Relation entre la RUM et la pente aux pas de 1500m et 150m (expression logarithmique)

Nous avons pris en compte l'effet de la pente aux résolutions de 150 et 1500 m de façon conjointe. On constate ainsi qu'à pente locale (150m) égale, plus la pente globale (1500m) augmente et plus la RUM est faible. Ce résultat est vrai pour des valeurs de pente locale inférieures à 7%. En revanche, lorsque la pente locale est forte, la RUM est toujours faible, que la pente globale soit faible ou forte.

Ce constat est cohérent avec les connaissances empiriques :

- pour une pente locale (150m) faible, une pente globale (1500m) plus forte amplifie le départ de matériau,
- pour une pente locale (150m) forte, le départ de matériau est déjà tellement important qu'une pente globale forte (1500m) n'amplifie pas le phénomène.

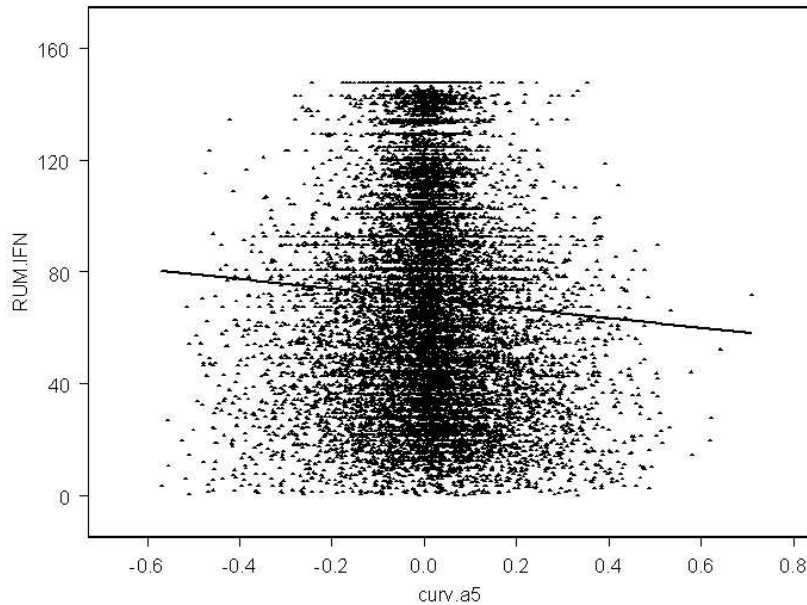


Figure 11 : Relation entre la RUM et l'indice de courbure (pixel de 250m)

La RUM est plus élevée lorsque le relief est concave (courbure < 0), en zone d'apport de matériau. A l'inverse, la RUM est plus faible lorsque le relief est convexe (courbure > 0), en zone de départ de matériau. Ce constat est cohérent avec les connaissances empiriques car l'accumulation de matériau meuble sur l'épaisseur du profil augmente la profondeur prospectable.

Une fois le modèle défini, une première cartographie de la RUM peut être obtenue par spatialisation.

5.2 Cartographie numérique de la RUM au pas de 50m (avant krigeage des résidus)

Le modèle a été calculé sous SIG à l'aide des variables spatialisées qui rentrent dans sa composition afin de produire une carte numérique au pas de 50 mètres (qui représente la résolution du MNT utilisé).

Pour chaque pixel de 50m, la valeur prédite de la RUM est calculée à partir :

- de la valeur du coefficient de la géologie au niveau du pixel,
- de la valeur de la pente locale (150m) en fonction du type de roche,
- de la valeur de la pente globale (1500m) en fonction du type de roche,
- de la valeur de la courbure du relief.

On obtient ainsi la carte de la RUM au pas de 50m (avant krigeage) :

Carte des RUM au pas de 50m (avant krigeage des résidus)

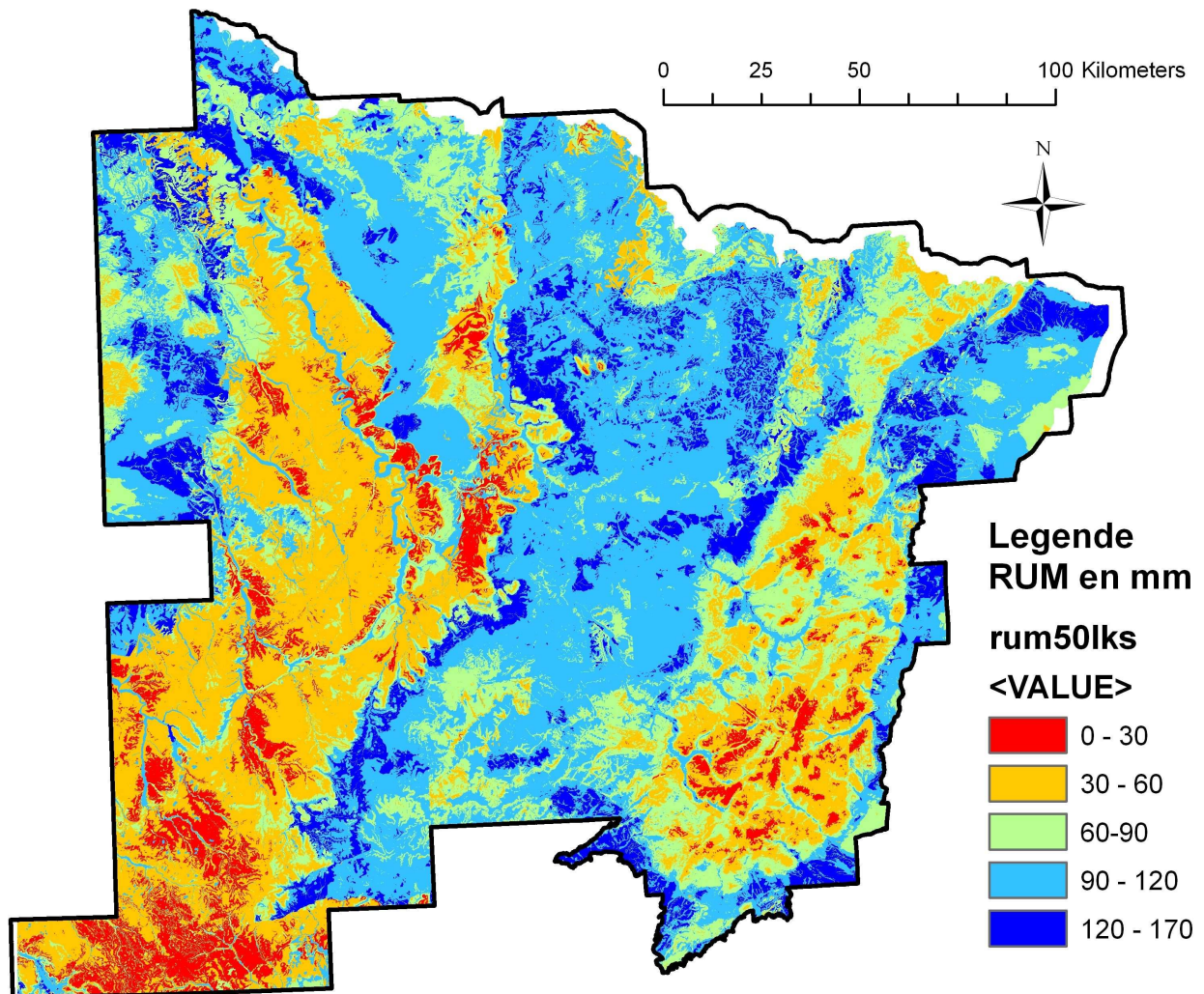


Figure 12 : Carte de la RUM des sols forestiers au pas de 50m avant krigeage (Nord-Est)

L'analyse de la carte va maintenant permettre de visualiser les résidus, erreurs de prédiction de la carte.

5.3 Analyse et krigeage des résidus

Les résidus du modèle représentent la différence entre la prédiction et la valeur mesurée sur le terrain. Les résidus du modèle ont été calculés et cartographiés :

Carte des résidus du modèle (données ponctuelles)

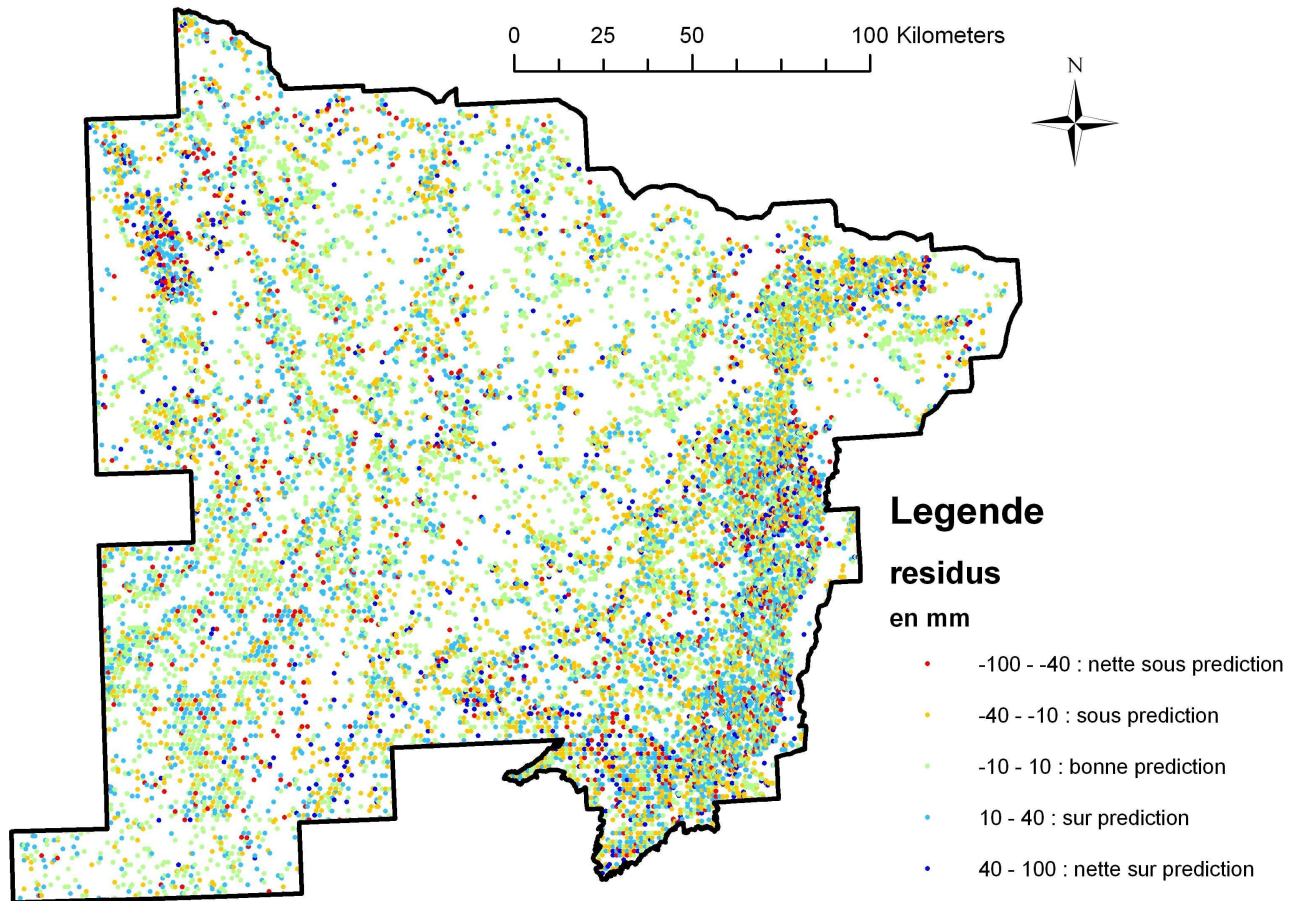


Figure 13 : Représentation cartographique des résidus du modèle de RUM (jeu de calibration IFN)

La partie sud des Vosges et l'Argonne sont moins bien modélisés (résidus localement plus importants, aussi bien négativement que positivement). La différence vient probablement du fait que les matériaux géologiques sont hétérogènes spatialement et/ou en compacité. Cette hétérogénéité est difficile à expliquer dans le modèle, ce qui augmente les valeurs des résidus.

Pour corriger les estimations dans les endroits où elles le nécessitent, les résidus ont été krigés au pas de 50 mètres (méthode du krigeage ordinaire). Cela consiste à interpoler spatialement les résidus à partir des relevés IFN utilisés pour la calibration du modèle.

L'intégration des résidus spatialisés dans le modèle permet d'aboutir à la version finale de la carte des RUM au pas de 50m.

5.4 Cartographie numérique de la RUM au pas de 50m (après krigeage des résidus)

Les résidus krigés ont été ajoutés à la cartographie des RUM réalisée à l'issue de l'étape de modélisation.

On obtient ainsi la carte de la RUM au pas de 50m suivante :

Carte de la RUM des sols au pas de 50m (Nord-Est de la France)

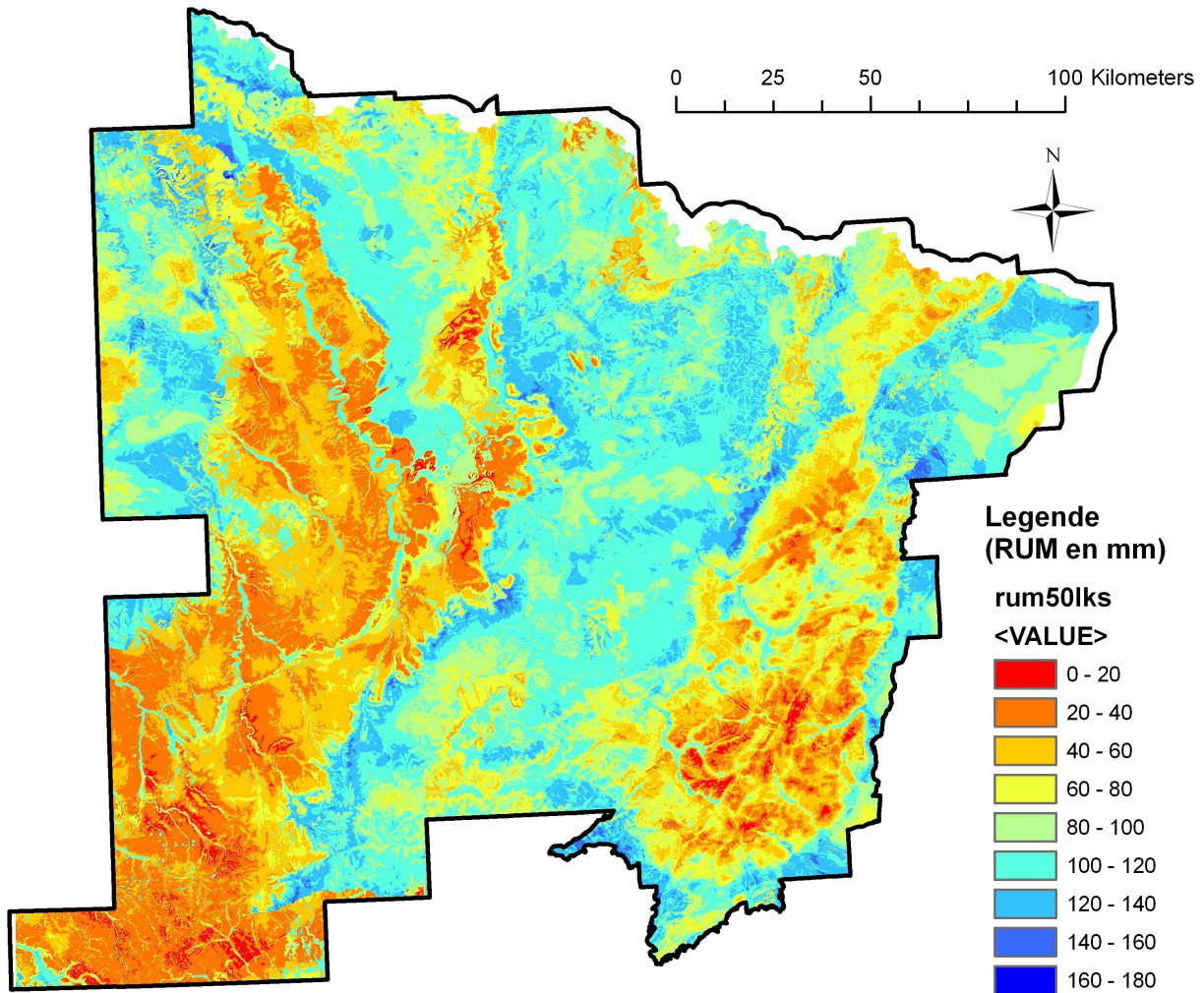


Figure 14 : Carte à haute résolution de la RUM des sols forestiers du Nord-Est de la France

L'analyse de la carte permet de distinguer 3 zones distinctes :

- les plateaux calcaires à l'Ouest, avec des valeurs de RUM généralement inférieures à 50mm, surtout dans la partie Sud-Ouest (calcaires de comblanchien).
- les Vosges à l'Est, avec des valeurs de RUM généralement inférieures à 70mm.
- la partie centrale, incluant notamment le plateau lorrain, avec les valeurs de RUM les plus élevées (de 80 à 150mm).

La RUM représente la capacité maximale de stockage de l'eau pour les végétaux, or elle ne préjuge en rien de l'évolution et du réel stock d'eau disponible au cours de l'année. C'est le calcul du déficit hydrique qui permet d'obtenir cette information.

5.5 Calcul du déficit hydrique estival (Méthode de Thornthwaite)

Dans l'étude « Caractérisation de la contrainte hydrique des sols pour prendre en compte les effets des changements climatiques dans les stations forestières » (JB.Richard, 2011), le déficit hydrique estival (juin-juillet-août) a été jugé le plus pertinent pour évaluer la contrainte hydrique.

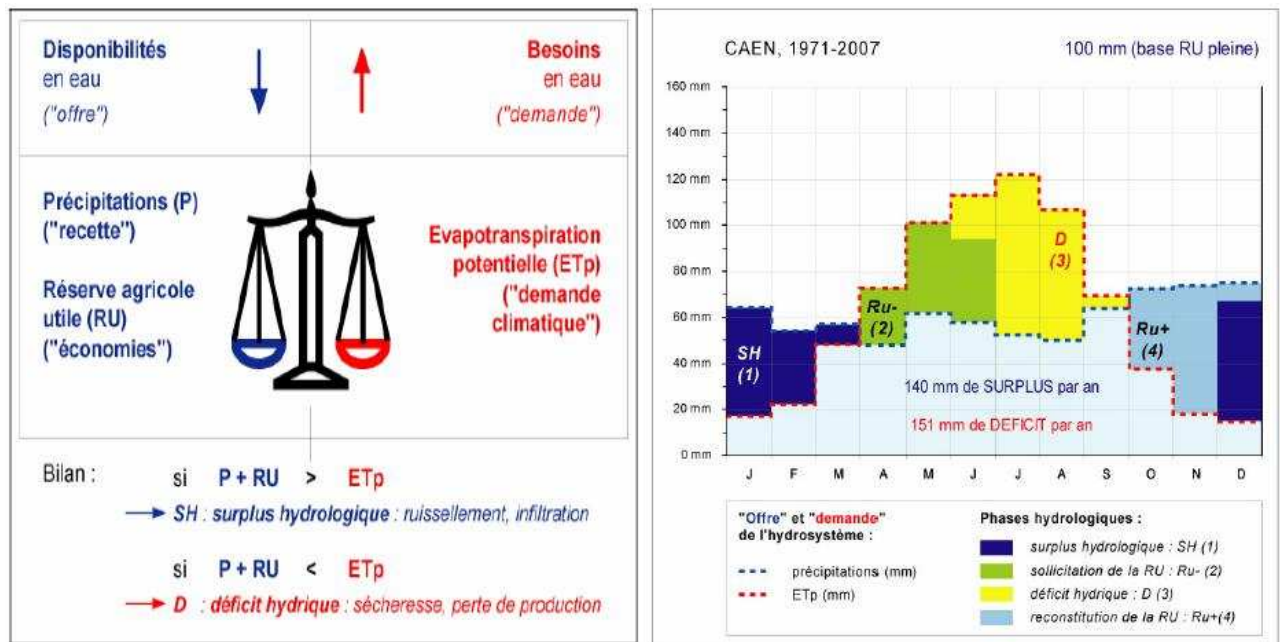


Figure 15 : Représentation du déficit hydrique estival (Cantat et al, 2010)

Pour un mois n, on a : Bilan hydrique édaphique = $P(n) + RU(n-1) - ETp$.

Lorsque l'évapotranspiration (ETP) est supérieure au niveau des précipitations, la réserve utile stockée le mois précédent est sollicitée. Lorsque les précipitations et la réserve utile ne peuvent plus compenser l'ETP, alors il y a un déficit hydrique (indiqué en jaune sur le graphique). Le déficit hydrique estival correspond à la somme des bilans hydriques négatifs pris sur les mois de juin, juillet et août, c'est-à-dire pendant la saison de végétation.

Le déficit hydrique estival représente la contrainte hydrique supportée par les essences pour les mois d'été.

La spatialisation au pas de 50m du déficit hydrique estival sur le Nord-Est de la France a été réalisée à partir de la carte des RUM et des données climatiques (P, ETP) à l'aide d'une macro développée par C.Piedallu.

Le résultat est le suivant :

Cartographie à haute résolution du déficit hydrique estival (en mm) sur le Nord-Est de la France

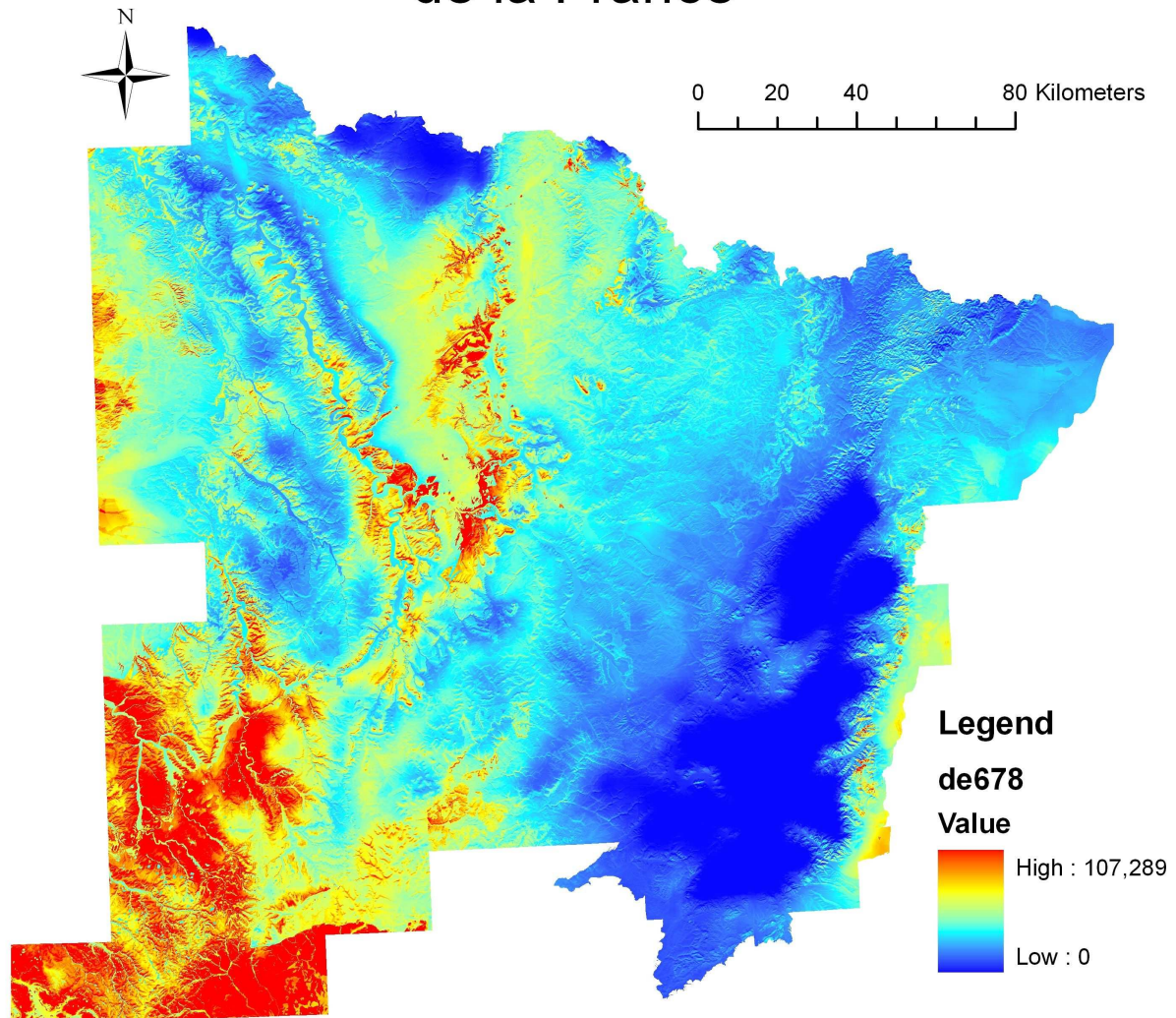


Figure 16 : Cartographie à haute résolution du déficit hydrique estival (en mm) sur le Nord-Est de la France

Le résultat cartographique est assez différent de ce que l'on peut observer pour la RUM. En effet, dans la partie Sud-Ouest des plateaux calcaires, les plus faibles précipitations aggravent les faibles RUM. L'inverse se produit pour les Vosges puisque les fortes précipitations compensent nettement les faibles RUM car le déficit hydrique estival est globalement nul.

Pour évaluer la qualité prédictive, il est alors nécessaire de valider les cartes produites avec des jeux de données indépendants.

6 Validation de la carte des RUM et limites de la méthodologie

Pour valider la carte des RUM, plusieurs échelles de validation sont utilisées.

6.1 Validation de la carte des RUM sur l'ensemble de la zone d'étude

La validation du modèle à l'échelle du site d'étude nécessite d'utiliser un jeu de données indépendant, c'est-à-dire qui n'a pas été utilisé pour la réalisation de la carte.

Les données des 2408 placettes de la nouvelle méthode d'inventaire de l'IFN disponibles sur la Lorraine n'ont pas pu être utilisées car l'IFN applique un floutage de +/-500m sur chacune des placettes, rendant impossible la comparaison de cartes avec des pixels variant entre 500 et 50 mètres.

Nous avons utilisé un jeu de placettes IFN ancienne méthode qui n'a pas été utilisé lors de la création de la carte de RUM et qui contient 1455 placettes sur le site d'étude (voir carte ci-après). Ces placettes couvrent de façon relativement homogène la zone sans sur-échantillonnage ou sous-échantillonnage. Les Vosges et l'Argonne présentent un réseau dense de placettes mais ce sont naturellement des zones fortement boisées. Ce réseau de placettes est bien adapté pour la validation du modèle.

Les résultats de la validation de la carte des RUM sont :

Cartographie	RUM au pas de 500m après krigeage	RUM au pas de 50m, avant krigeage	RUM au pas de 50m, après krigeage
R ²	0,47	0,40	0,54
RMSE	28	30	26

La carte des RUM au pas de 50m améliore la qualité prédictive par rapport à la carte des RUM au pas de 500m.

Le krigeage des résidus du modèle de calibration améliore nettement la précision.

La représentation cartographique des résidus sur les données de validation permet de visualiser les zones sur-prédites par le modèle (résidus positifs) et les zones sous-prédites (résidus négatifs) :

Validation de la carte de la RUM des sols au pas de 50m

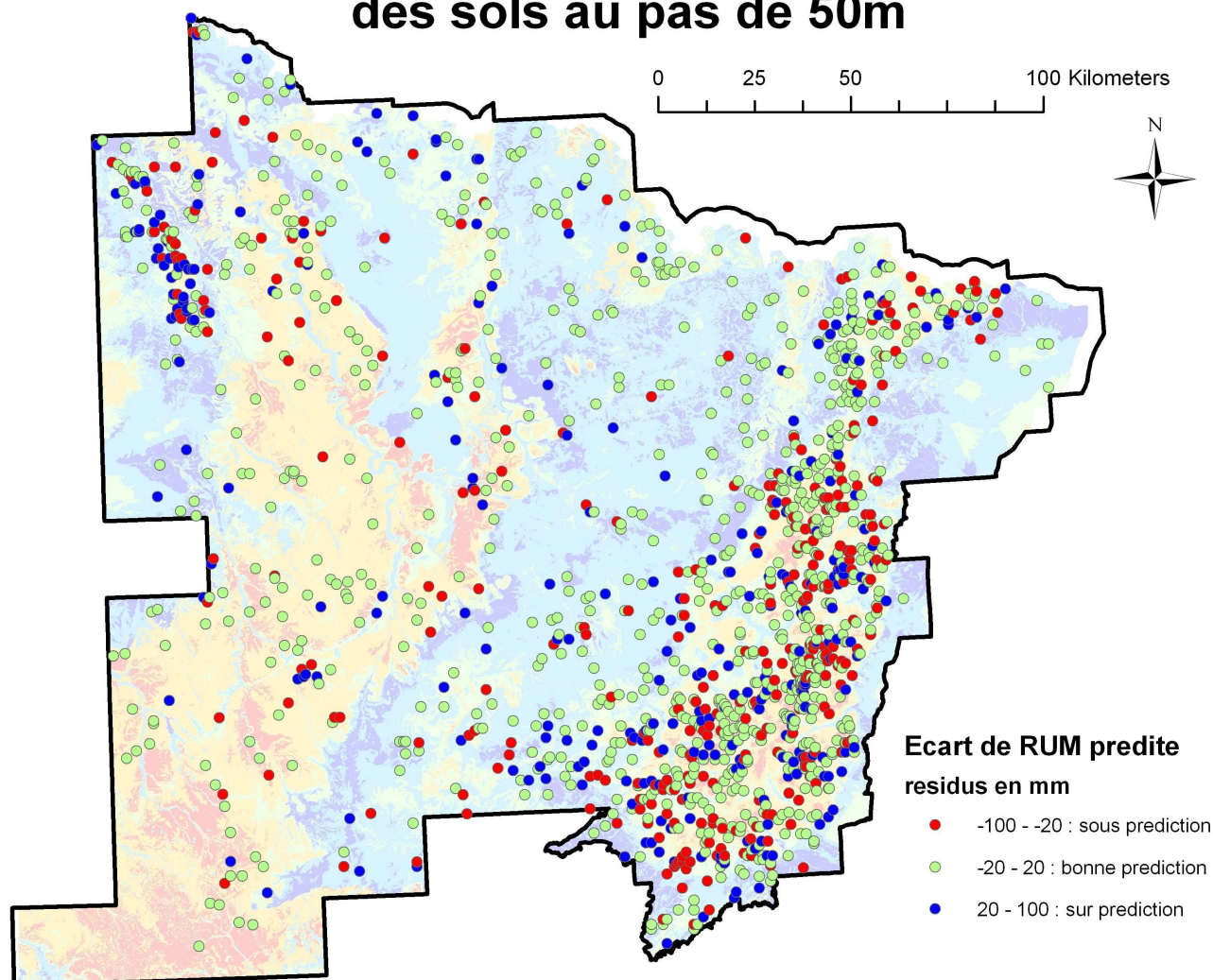


Figure 17 : Représentation cartographique des résidus après krigeage (jeu de validation IFN)

Globalement, on observe une répartition des résidus pour le jeu de validation semblable à celle sur le jeu de calibration. Des résidus importants sont encore présents dans les Vosges et l'Argonne mais ils sont moins nombreux.

Après avoir validé la carte à l'échelle régionale, il est important maintenant de s'assurer que la carte peut aussi être utilisée à des échelles locales.

6.2 Validation du modèle à des échelles plus locales

Une validation à des échelles plus locales a été réalisée. En effet, l'intérêt d'une cartographie au pas de 50m est aussi de pouvoir être utilisable aussi bien à large échelle que plus localement.

Au final, la précision de la carte des RUM au pas de 50m est évaluée :

- à l'échelle du massif, sur le site de Bure (55) couvrant au total 200 km² avec 105 points de relevés,

- à l'échelle de la forêt avec un maillage de 250m, sur le site de Villey le Sec et Bois l'Evêque, avec 92 points de relevés,
- à l'échelle de quelques parcelles, avec un maillage de 100m, sur le site de Bois l'Evêque, avec 47 points de relevés,
- à l'échelle de la parcelle, avec un maillage de 50m, sur le site de Bois l'Evêque, avec 39 points de relevés.

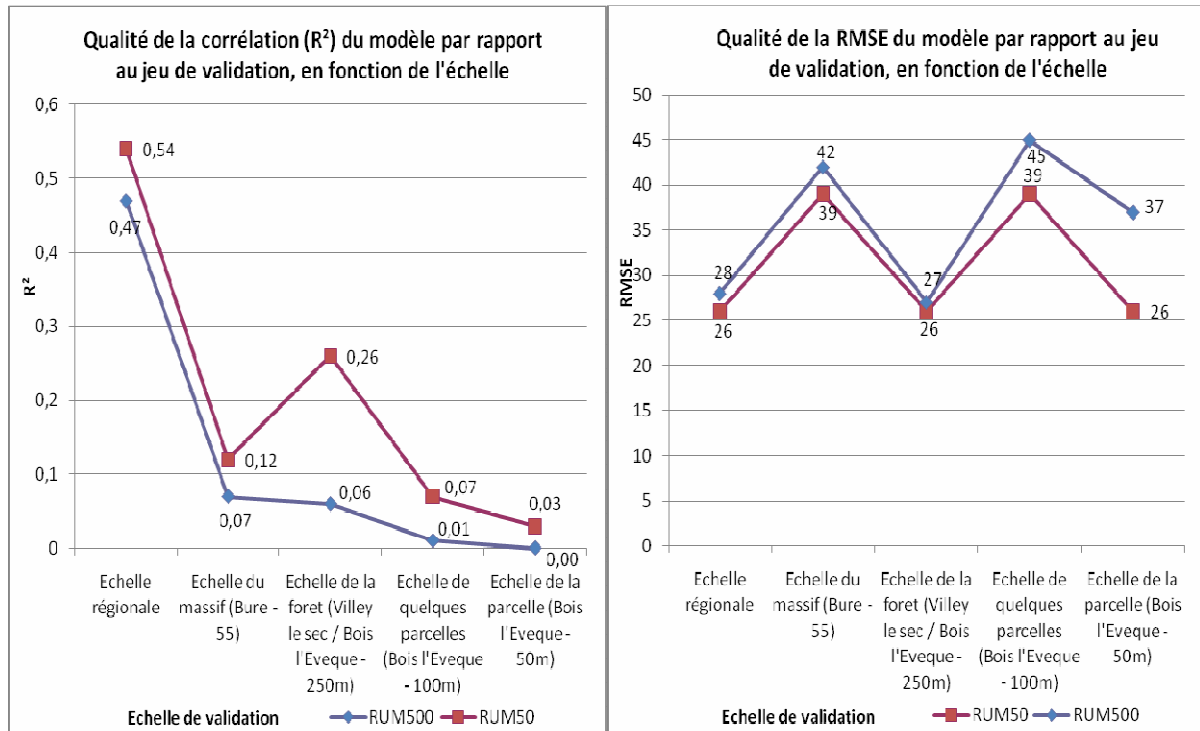


Figure 18 : Valeurs des R^2 et RMSE par rapport au jeu de validation, en fonction de l'échelle

6.2.1 Validation du modèle à l'échelle du massif

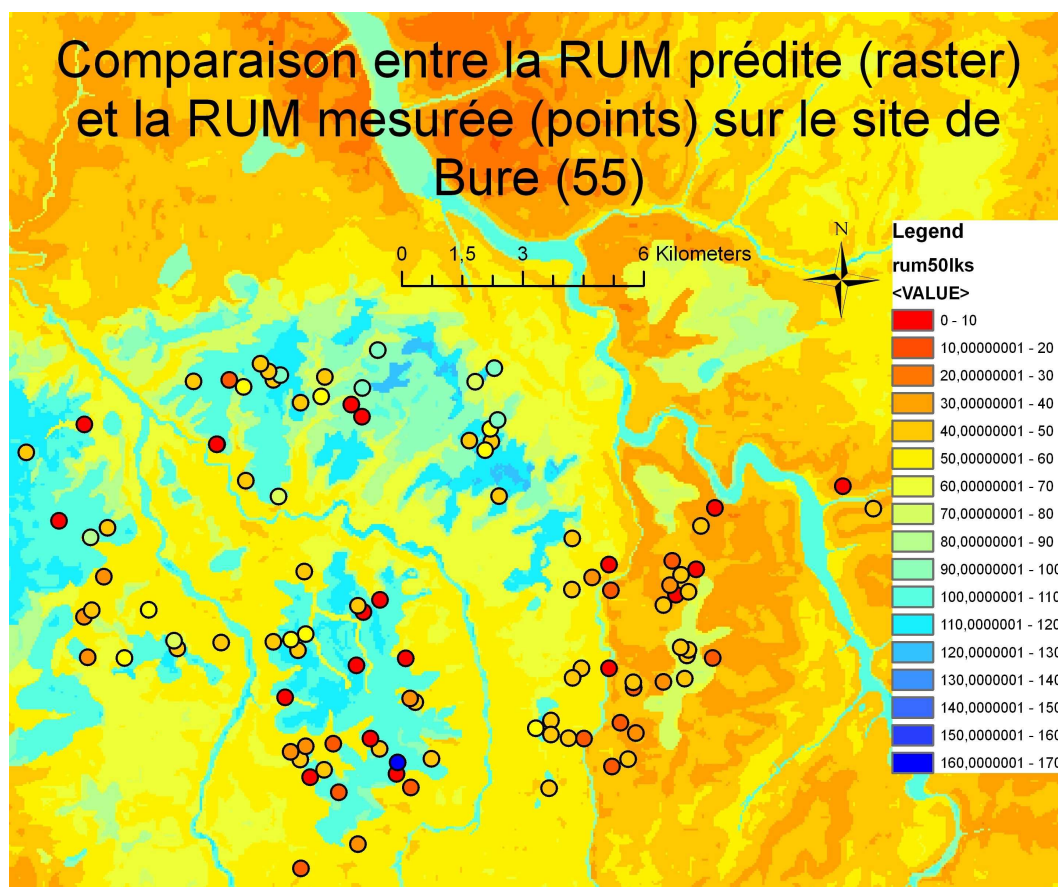


Figure 19 : Comparaison des valeurs de RUM prédites et mesurées sur le site de Bure (55)

Les données du site de Bure sont plutôt incohérentes, peu corrélées et difficilement interprétables. En effet, le R^2 chute nettement en passant à cette échelle ($R^2=0.07$). Deux hypothèses peuvent expliquer cette différence :

- les couches sableuses du Valanginien sont théoriquement meubles. Mais peut-être y-a-t'il une imprécision dans le contour de la carte géologique ? ou bien l'épaisseur des sables est-elle fine et les calcaires sous-jacents (Portlandien) sont-ils rapidement atteints dans les sondages ?
- la méthode de description du profil de sol réalisée sur le site de Bure (55) est censée être comparable avec la méthode IFN mais peut-être des écarts sont-ils apparus au moment de l'estimation de la texture ou du traitement des données ?

Les données du massif de Bure ne sont pas exploitables pour la RUM. Ce résultat confirme le constat déjà fait pour la validation de la carte du pH au pas de 50m.

6.2.2 Validation du modèle à l'échelle de la forêt

Pour le site de Villey le Sec – Bois l'Evêque :

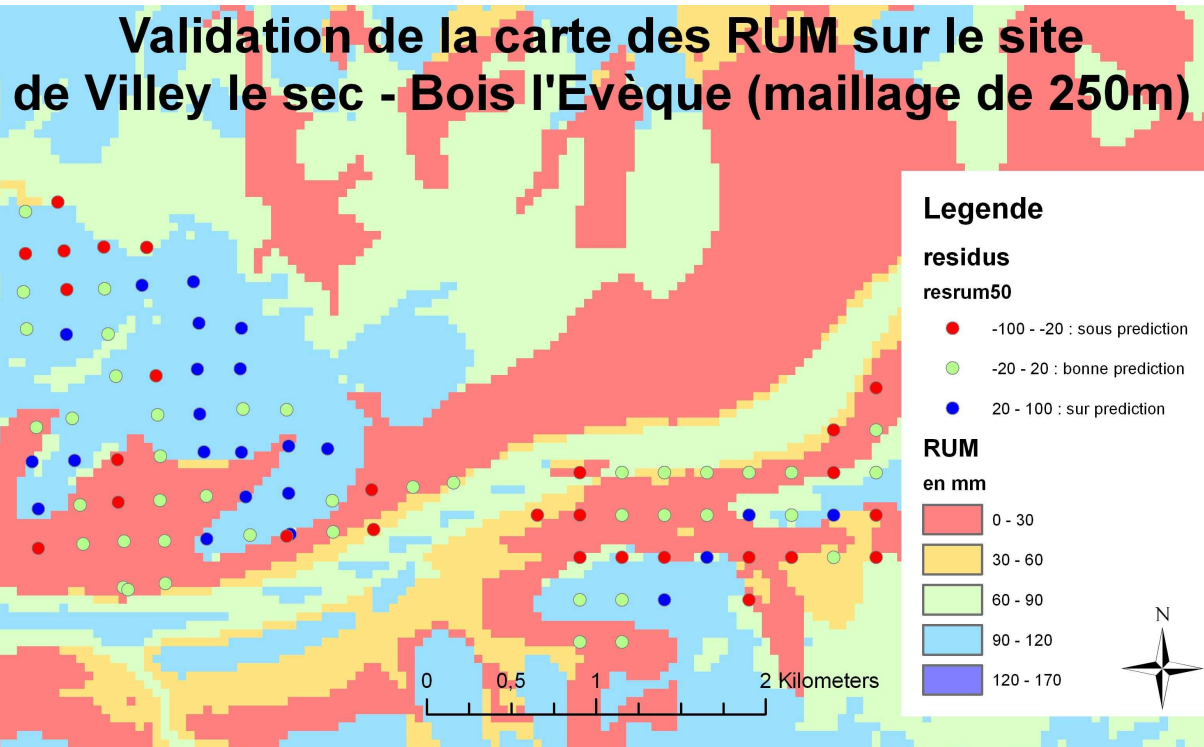


Figure 20 : Comparaison des valeurs de RUM prédites et mesurées sur le site de Villey le sec – Bois l’Evèque (maillage de 250m) - 54

Le maillage à 250m prédit la RUM avec une bonne précision, surtout en intégrant bien la variabilité géologique. Sur la carte ci-dessus, on voit bien les différences de RUM prédites grâce à la géologie (placages limoneux, alluvions anciennes). Pourtant, le R^2 est de 0,26, donc peu corrélé apparemment. Le nombre de placettes est de 92 donc chaque relevé a un poids important dans la corrélation. Le fait de supprimer les 7 points les plus aberrants du maillage (écart > 70mm entre la RUM prédite et la RUM mesurée) porte le R^2 à 0,40.

La carte de la RUM au pas de 50m peut être utilisée avec une relativement bonne fiabilité à l’échelle de la forêt pour le site de Villey le sec - Bois l’Evèque.

6.2.3 Validation du modèle à l'échelle de la parcelle ou du groupe de parcelles

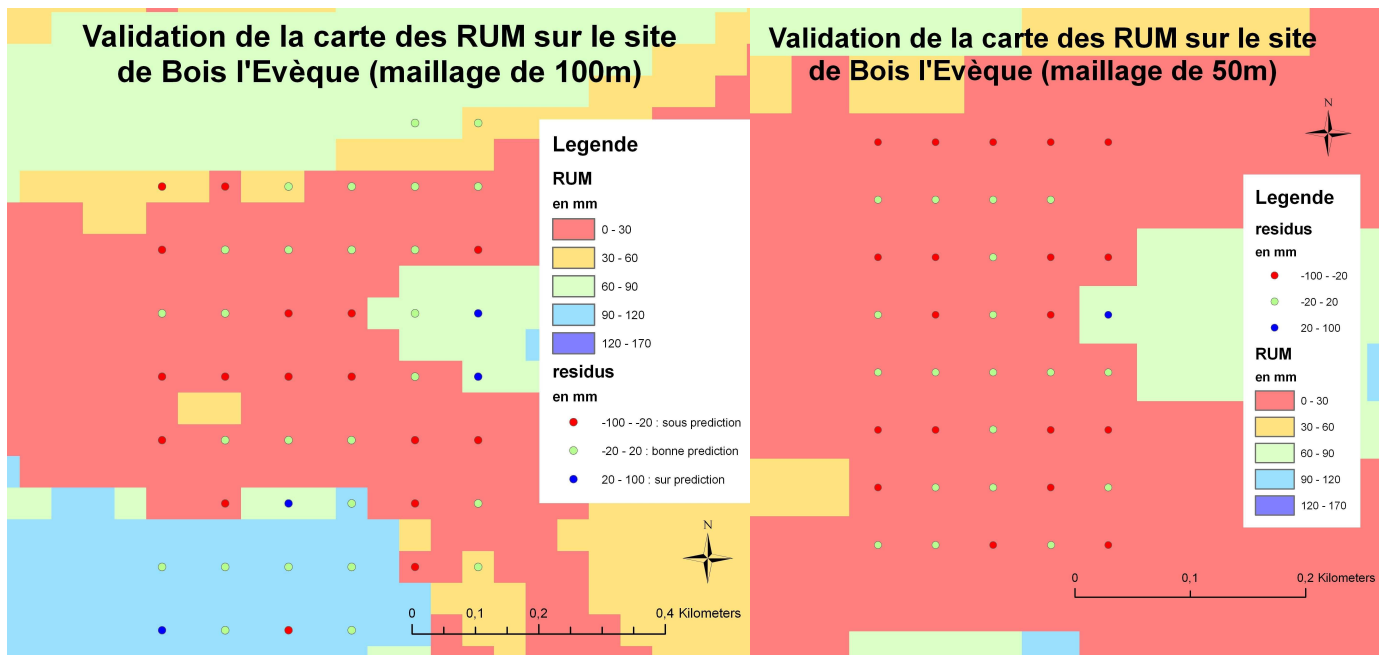


Figure 21 : Comparaison des valeurs de RUM prédites et mesurées sur le site de Bois l'Evêque (maillage de 100 et 50m) - 54

Sur le maillage de 100m, le R^2 est de 0,07 et diminue encore plus pour le maillage de 50m avec $R^2=0,03$. Le maillage de 100m a une variabilité géologique plus importante en incluant des placages limoneux au Sud-Ouest, ce qui explique la meilleure corrélation. A l'inverse, la variabilité du maillage de 50m ne permet pas d'obtenir une bonne corrélation. Les valeurs de RUM plus élevées dans le fond du vallon ne sont pas bien prédites par la carte. Comme pour le maillage de 250m, le poids des points aberrants peut être important. En supprimant les 7 points les plus aberrants (écart $> 63\text{mm}$), on obtient un R^2 de 0,38 pour le maillage à 100m. Pour le maillage à 50m, l'écart est tel que, même en supprimant les points aberrants, le R^2 augmente faiblement.

Deux constats intéressants peuvent être tirés des deux cartes ci-dessus pour expliquer la présence de points aberrants :

- pour le maillage à 100m : les effets de bordure entre les calcaires et les placages limoneux sont importants. Au centre-ouest de la carte, des relevés à faible RUM prédite sont en réalité à forte RUM mesurée sur le terrain. Théoriquement situés sur calcaire, ils sont en fait probablement situés sur des limons, à quelques mètres près. Dès lors, pour améliorer la prédiction, il serait intéressant de « tamponner » ces zones pour atténuer les effets de bordure, ou bien introduire une variable intégrant la distance aux placages limoneux.
- pour le maillage à 50m : la pente avec un pixel de 150m marche bien aux échelles régionales et à l'échelle d'une forêt mais elle ne permet pas de prendre en compte les petits vallons très étroits des plateaux calcaires. En effet, certains points à forte RUM mesurée (au sud du maillage) sont au milieu des zones à faible RUM prédites. Ils correspondent en réalité à un fond de vallon non pris en compte en prédiction. Dès lors, pour améliorer le modèle dans les petits vallons étroits, il serait intéressant d'introduire en plus la pente et/ou la concavité au plus petit pixel possible.

C'est surtout dans les maillages à forte variabilité géologique que les prédictions sont les meilleures. La variabilité topographique semble moins bien prise en compte dans le modèle pour avoir une bonne précision à l'échelle d'une parcelle.

Pour la forêt de Bois l'Evêque, la carte de la RUM au pas de 50m :

- peut être utilisée avec fiabilité à l'échelle de la forêt,
- doit encore être améliorée pour une utilisation fiable à l'échelle de la parcelle ou d'un groupe de parcelle.

A l'échelle de la parcelle, la variabilité géologique est peu importante. C'est alors la variabilité topographique qui explique la variabilité de la RUM. Les données topographiques doivent être mieux prises en compte dans le modèle, surtout les données topographiques locales calculées sur un pixel de 50m.

6.3 Comparaison entre la cartographie au pas de 500m et la cartographie au pas de 50m – améliorations apportées

Visuellement, à l'échelle régionale, la carte de la RUM au pas de 50m (voir §5.4) et la carte au pas de 500m (voir annexe 2) donne sensiblement le même résultat. Le R^2 est toutefois meilleur pour la carte au pas de 50m (0,54) que pour la carte au pas de 500m (0,47).

Dans les deux graphiques en tête du paragraphe précédent, le R^2 est systématiquement meilleur à des échelles plus locales pour la carte de la RUM au pas de 50m, comparée à la carte de la RUM au pas de 500m .

Ce résultat est particulièrement valable pour le site de Villey le sec (maillage de 250m).

Représentation cartographique de l'amélioration de la prédiction entre le pas de 50m et le pas de 500m

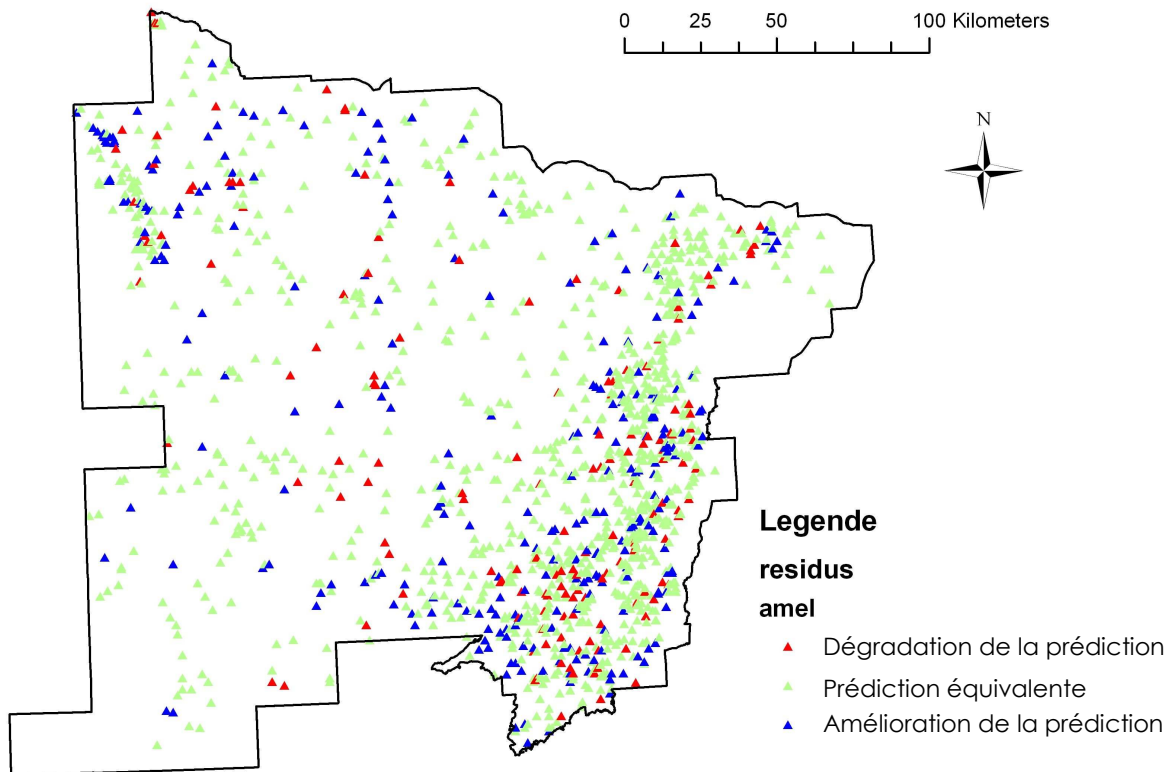


Figure 22 : Représentation cartographique de l'amélioration de la prédiction entre le pas de 50m et le pas de 500m

Globalement, la RUM au pas de 50m améliore la prédiction, notamment au sud des Vosges. En revanche, il y a une dégradation de la prédiction sur la partie centrale des Vosges. La carte de la RUM au pas de 50m offre une meilleure lisibilité à l'échelle locale :

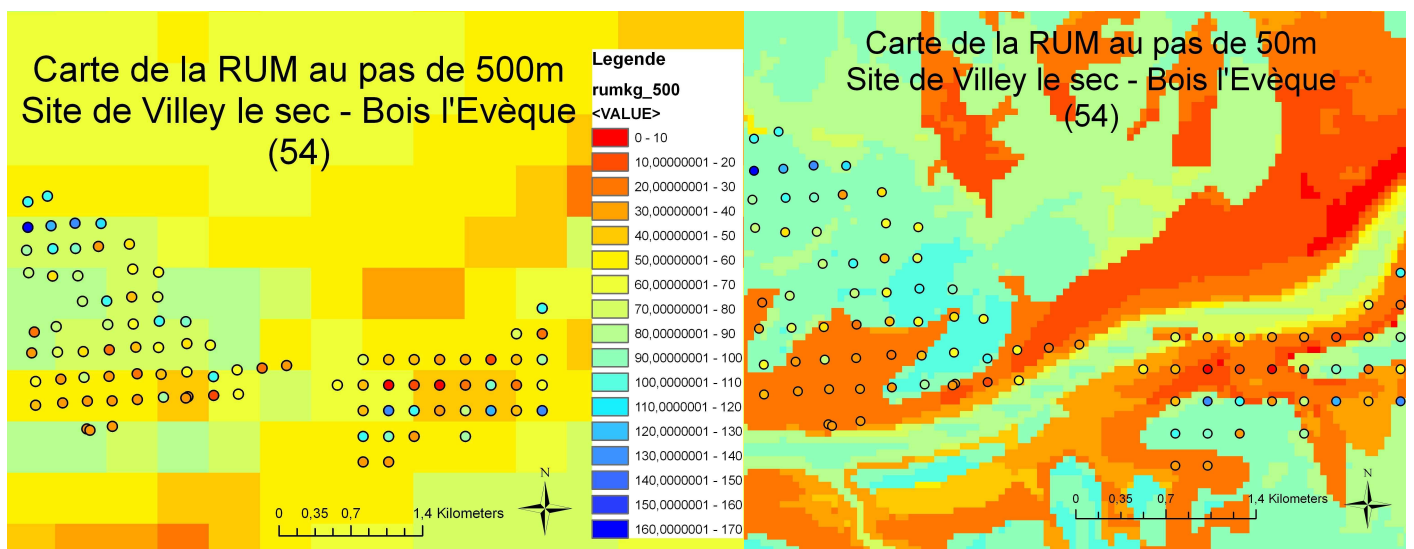


Figure 23 : Comparaison de la précision des pixels entre les cartes aux pas de 50 et 500m

Les points de relevés d'un même site, Villey le sec – Bois l'Evêque (maillage de 250m) sont ici représentés avec deux pas de carte différents (50m et 500m).

La pertinence est nettement meilleure pour le pas de 50m, pour lequel on arrive à distinguer les effets du relief et de la géologie. Ces variations à haute résolution sont bien retranscrites. En revanche, au pas de 500m, la grosse taille du pixel ne permet pas une bonne utilisation par les gestionnaires pour appréhender la variabilité de la RUM à l'échelle d'une forêt.

7. Limites et améliorations possibles de la qualité prédictive de la carte des RUM au pas de 50m

Après avoir établi et validé la carte de la RUM au pas de 50m, les limites de la méthodologie utilisée sont maintenant présentées. Des améliorations sont proposées concernant :

- les données utilisées pour la calibration du modèle,
- la précision des variables prises dans le modèle,
- la validation du modèle.

7.1. Les limites et améliorations liées aux relevés et à l'estimation de la RUM utilisés dans la calibration du modèle

Les relevés IFN de l'ancienne méthode ne sont pas floutés à +/- 500m comme ceux de la nouvelle méthode. En revanche il n'y a pas de précision annoncée pour la localisation des relevés. Les données IFN ancienne méthode devraient être localisées avec précision bien qu'il semble exister une certaine variabilité entre les campagnes. Pour les dernières campagnes, la précision serait de l'ordre de 50m (T.Belouard, comm. pers.). Pour affiner la précision annoncée dans le modèle de RUM, il serait intéressant de confirmer cette précision.

Pour une placette de 50m de côté, la RUM peut être très hétérogène selon l'endroit exact où est faite la description du profil de sol. L'étude réalisée en Champagne par JB.Richard sur 10 placettes de 50m de côté (Richard, 2011) décrite chacune par 5 sous-placettes indépendantes a montré que les valeurs de RUM décrites avaient une amplitude de +/- 33% par rapport à la moyenne. L'hétérogénéité spatiale est donc importante à très fine échelle et apporte une incertitude quant à la valeur réelle de la RUM en fonction du point de relevé, à 10m près.

Une autre source d'imprécision dans la calibration du modèle est la méthode d'estimation de la RUM sur les points de relevés. Le protocole est bien défini mais il est potentiellement soumis à de nombreux effets opérateurs :

- Sur un même site, la profondeur réellement prospectée peut dépendre de l'opérateur,
- L'estimation de la texture se fait au toucher, c'est-à-dire qualitativement,
- La charge en cailloux est estimée visuellement.

Il n'est pas réaliste de faire analyser tous les relevés en laboratoire pour éliminer tout effet opérateur. En revanche, une analyse aléatoire de certains relevés permettrait de quantifier l'effet opérateur et d'annoncer une précision à l'estimation.

La relative imprécision des données de calibration est compensée en partie par le grand nombre de relevés utilisé pour l'étude (15 369).

7.2 Les limites et améliorations liées à la précision des variables utilisées dans le modèle

Prédire séparément la profondeur, la texture et la charge en cailloux pour mieux expliquer la RUM.

Dans la présente étude, la RUM est modélisée dans son ensemble. Le fait de modéliser séparément la profondeur du sol, la texture et la charge en cailloux permet d'améliorer la qualité de la prédiction (Emberger, 2010). Cette approche permet de mieux expliquer séparément chacun des phénomènes par rapport au comportement des roches et de la topographie. La RUM, au contraire, intègre plusieurs paramètres et il est moins évident d'expliquer a posteriori le rôle de chacune des variables.

Cette méthode séparant profondeur du sol, texture et charge en cailloux permet au final un gain de prédiction (Emberger, 2010). Néanmoins elle s'accompagne d'une perte de précision car la RUM est alors estimée sur un horizon, au lieu de deux décrits dans la méthodologie définie par C.Piedallu avec la méthode d'Al Majou (Piedallu, 2010).

En créant des variables telles que la distance aux placages limoneux, la distance aux roches dures et la distance aux roches meubles, l'imprécision liée aux contours exacts des couches géologiques pourrait être atténuée.

Les couches géologiques non chronologiques tels que les placages limoneux posent des difficultés dans leur représentation cartographique. Leur épaisseur est souvent très variable, voire discontinue. Pour un géologue, une couche de limons inférieure à 80cm est superficielle, alors qu'elle représente un intérêt pour le forestier. La représentation cartographique du géologue ne correspond donc pas forcément à celle du forestier. Créer une variable donnant la distance au placage limoneux le plus proche permettrait de prendre en compte les éventuelles imprécisions de cartographies.

Les limites des couches géologiques ne sont pas forcément aussi tranchées dans la réalité que sur la carte, cela dépend notamment du pendage. La transition est alors progressive. Pour prendre en compte cette réalité, deux autres variables donnant la distance aux roches dures ou aux roches meubles pourraient permettre d'améliorer les effets de transition.

Les variables topographiques sur de très petites emprises doivent être intégrés dans le modèle pour mieux prédire la RUM à l'échelle locale dans les vallons étroits.

Avec les variables utilisées, le modèle ne prédit pas très bien la variabilité de RUM dans les vallons étroits (voir §6.2). Pour améliorer la qualité prédictive à l'échelle locale, des variables avec une emprise plus petites doivent être intégrées au modèle, même si leur part explicative est faible à large échelle (ex : pente au pas de 50m, indice de courbure sur un carré de 3 pixels de 50m, ...).

Avec l'acquisition des couches géologiques du BRGM harmonisées au niveau départemental, le travail d'harmonisation régionale de la géologie pourrait être réduit en temps.

L'harmonisation manuelle des couches géologiques nécessite un temps important. A titre d'exemple, l'harmonisation de la géologie sur l'ensemble de la zone, excepté les Vosges, a concerné 70 cartes et demandé un mois de codification sous SIG.

Le BRGM commercialise des couches géologiques harmonisées qui semblent correspondre au besoin de données géologiques harmonisées pour la modélisation. L'inconvénient majeur est leur coût qui est important. L'idéal serait alors de tester la qualité des couches géologiques produites et pouvoir intégrer leur achat en amont des projets. Une telle acquisition permettrait un gain de temps important pour les études à venir. Les notices harmonisées départementales ont été comparées avec les codes HR1. Cette comparaison a montré une cohérence entre les deux approches. La méthode d'harmonisation manuelle permet toutefois de mieux prendre en compte la variabilité géographique du comportement des roches vis-à-vis de la RUM.

L'harmonisation géologique manuelle pourrait être critiquée sur la caractérisation des couches géologiques à partir de classes de RUM. Le fait d'étudier séparément profondeur du sol, texture et charge en cailloux permettrait de prendre en compte de façon plus cohérente ces classes de RUM car elles correspondraient alors plus à une réalité observée.

Pour redécouper chacune des couches géologiques harmonisées du BRGM, on pourrait alors kriger séparément les variables à expliquer (profondeur, texture, charge en cailloux). Pour chacune des couches géologiques élémentaires, un redécoupage peut alors être fait en fonction des valeurs pour une variable à expliquer donnée.

7.3 Les limites et améliorations liées à la validation du modèle

Un jeu de données indépendant issu de l'ancienne méthode IFN a pu être utilisé pour la validation du modèle (voir § 6.1).

L'idéal serait pourtant d'utiliser le jeu de données non flouté de la nouvelle méthode de l'IFN. En effet, il a deux avantages importants par rapport à l'ancienne méthode :

- une meilleure précision,
- une meilleure répartition spatiale pour la validation.

Il est cependant difficile dans l'immédiat de disposer de ces données non floutées.

Les données de validation extraites de l'ancienne méthode sont actuellement le jeu de données le mieux approprié pour valider le modèle. Avec le recul, l'idéal serait de partir de l'ensemble des données anciennes méthodes (calibration et validation) et de rééchantillonner un jeu de validation aléatoire spécifique à cette étude.

Une fois la carte de la RUM validée et les limites d'utilisation fixées, il est intéressant de voir quelle peut être son utilité pour les gestionnaires forestiers.

8. La cartographie de la RUM à haute résolution, un nouvel outil pour les gestionnaires forestiers

8.1 Un nouvel outil pour appréhender les stations forestières : une nécessité face aux changements climatiques

Historiquement deux méthodes existent pour établir des typologies de stations forestières :

- une approche phytosociologique, basée en priorité sur une description fine de la flore (communautés végétales) et de la pédologie. Elle est utilisée principalement en plaine (mais pas exclusivement). Cette approche a été initiée par Alain Brethes avec le catalogue des plateaux calcaires de lorraine puis largement vulgarisée, notamment par Jean-Claude Rameau,
- une approche déterministe, basée en priorité sur des variables synthétiques du milieu telles que les niveaux hydrique ou trophiques. Elle est utilisée principalement en montagne (mais pas exclusivement). Cette approche a été initiée par A.Franc et T.Curt (1989) pour le massif central puis elle a été reprise et améliorée par Gegout et al (2006) en ajoutant une cartographie automatisée. Cette approche est également largement répandue en région méditerranéenne avec les travaux de J.Ladier.

L'objectif n'est pas ici d'opposer les deux méthodes qui, chacune, ont leur raison d'être mais plutôt de voir dans quelle mesure la cartographie de la RUM au pas de 50m peut améliorer les deux approches, et à quel niveau.

8.1.1 Le pas de 50m, une échelle utile au gestionnaire pour appréhender les stations forestières et leur cartographie au niveau local

Il est possible de se positionner, et donc d'avoir une valeur, sur n'importe quelle carte de RUM quelque soit l'échelle. Cependant, la précision et l'utilisation possible ne seront bien sûr pas les mêmes. C'est cette différence qu'il est ici intéressant d'analyser pour définir les utilisations possibles des cartes disponibles.

Considérons l'extrait de carte figurant au §6.3 :

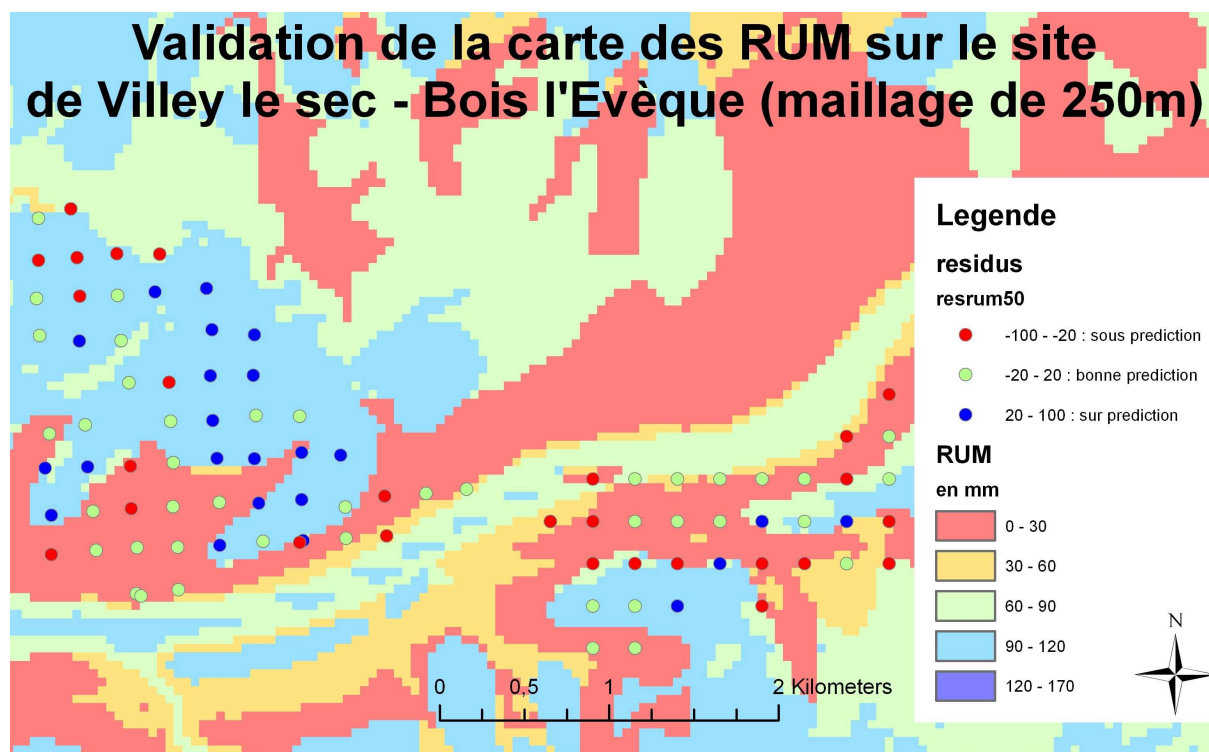


Figure 24 : Détail d'un extrait de carte / site de Villey le sec – Bois l'Evêque

L'intérêt de la carte au pas de 50m c'est que, même à une échelle locale au 250m, la représentation reste fiable (voir §6.2). Elle permet de représenter la RUM avec précision et avec un pixel fin, donc de rendre le résultat directement utilisable par le gestionnaire. Il reste cependant encore des améliorations à apporter pour mieux prendre en compte la géologie et la topographie (voir §6.2).

La carte de la RUM au pas de 50m ne remplace pas l'expérience du forestier, elle est complémentaire. L'utilisation d'une telle carte à une échelle locale mérite donc une expertise globale de terrain pour juger de la pertinence de l'utilisation comme donnée spatialisée.

D'après les conclusions du §6.2 sur le site de Bois l'Evêque – Villey le sec, l'utilisation d'une telle carte à l'échelle de la parcelle n'est pas recommandée. En revanche, pour un groupe de parcelles ou à l'échelle de la forêt, l'utilisation de la carte au pas de 50m est pertinente.

8.1.2 Apport de la RUM comme donnée complémentaire des typologies de stations pour évaluer la capacité des essences à résister aux changements climatiques – discussion en lien avec l'étude de JB Richard sur la caractérisation des contraintes hydriques

Avec la perspective des changements climatiques, le gestionnaire a maintenant besoin d'avoir à disposition des outils capables de quantifier la sensibilité des couples essence/station pour évaluer le risque climatique.

De nombreux indices bioclimatiques sont disponibles (Piedallu et al, 2007). En effet, depuis une décennie le gestionnaire a de plus en plus de données à disposition pour l'analyse et l'aide à la décision.

Ainsi, la RUM apporte une information complémentaire que le bilan hydrique climatique seul ne fournit pas, à savoir la capacité des sols à redistribuer en période de sécheresse l'eau stockée pendant les épisodes pluvieux.

L'étude en cours de JB Richard sur les plateaux calcaires a montré que le déficit hydrique estival (méthode Thornthwaite), indice synthétique, était la meilleure variable pour caractériser la contrainte hydrique des sols (Thornthwaite et Mather, 1955).

Cet indice hydrique permet d'avoir une nouvelle approche sur les stations forestières. Une évolution des typologies pourrait répondre aux attentes des gestionnaires. Dès lors, trois options sont envisageables :

1. caractériser chaque type de station avec une valeur moyenne de déficit hydrique estival,
2. redécouper chaque type de station en rajoutant un critère de déficit hydrique estival,
3. indiquer, pour chaque essence et pour l'ensemble des stations d'un même catalogue, les valeurs de déficit hydrique estival optimal, limite, et à risque.

L'analyse de JB Richard a montré que les valeurs moyennes de déficit hydrique définies par station ne sont pas significativement différentes, ce qui élimine l'option 1 pour des raisons de pertinence même si cela semblait l'option la plus simple à mettre en œuvre.

Redécouper chaque type de station comme préconisé dans l'option 2 pourrait être la solution la plus précise pour ensuite établir les risques par essence selon la station. Cependant, chaque essence ayant une exigence particulière vis-à-vis du déficit hydrique estival, ce redécoupage devrait quasiment être fait pour chaque essence recommandée pour une station. Le fait de multiplier le nombre de stations compliquerait la typologie et la rendrait rapidement inutilisable.

Au final, c'est la troisième option qui semble la plus réaliste. Dans les catalogues, cela peut se traduire en fin de document par une double page ouvrable avec, sur la partie droite, les valeurs de référence optimales, limites et à risque pour chaque essence.

Ces valeurs de référence sont spécifiques à chaque essence mais sont valables quelque soit la station. Elles pourraient être définies à partir :

- de la répartition actuelle de l'essence,
- de la simulation de l'aire de l'essence à moyen ou long terme sous l'effet des changements climatiques,
- des données de productivité de l'IFN,
- des données de dépérissement de l'IFN et du DSF.

Un tableau synthétique pourrait alors être élaboré (exemple fictif) :

DHE*	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
Hêtre	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Chêne sessile	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Chêne pédonculé	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Epicea commun	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Sapin pectiné	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Douglas	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

* : DHE : Déficit hydrique estival (en mm)

- : Conditions optimales
- : Conditions limites, changement d'essence à préférer mais, selon les moyens, possibilité de régénérer naturellement avec exploitabilité raccourcie
- : zone à risque, changement d'essence recommandé

Figure 25 : Exemple de tableau descriptif complémentaire aux typologies de stations forestières.

Pour certaines essences, la température maximale du mois le plus chaud constitue une contrainte comme cela a pu être constaté par exemple sur le Douglas en 2003. Par conséquent, cette donnée climatique peut également être rajoutée comme paramètre complémentaire des typologies de station.

Au final, pour la nouvelle version des typologies de station, le choix d'essence devrait se faire à une double condition pour être optimal :

- figurer parmi les essences recommandées dans la typologie des stations (en fonction de la topographie, de l'acidité, de l'humidité, ...)

- et être dans les conditions optimales vis-à-vis du déficit hydrique estival.

Dans cette démarche, la cartographie du déficit hydrique estival au pas de 50m réalisée à partir de la carte de RUM au pas de 50m est un outil complémentaire très utile.

8.1.3 Apport de la RUM au pas de 50m pour affiner les clés de détermination des typologies de stations forestières et leur cartographie automatisée

L'approche phytosociologique des stations forestières, plutôt descriptive, est très pertinente pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes forestiers. En revanche, elle ne permet pas d'évaluer le risque climatique des essences.

L'approche déterministe des stations forestières ne permet pas de décrire aussi bien le fonctionnement des écosystèmes que ne le fait l'approche phytosociologique. En revanche, sa simplicité de conception permet de simuler des évolutions de stations forestières dès lors que l'ensemble des données bioclimatiques et pédologiques sont disponibles (RUM, pH, précipitations, températures, ETP, ...).

En montagne, ce type d'approche a été mis en œuvre dans le Massif Central, les Vosges et dans les Alpes du sud.

Pour illustrer l'apport de la RUM dans une typologie de station, un exemple est pris en dehors de la Lorraine, avec les stations du Sud Massif Central.

⇒ Voir annexe 3 : Clé des stations forestières de la bordure Sud-Ouest du Massif Central.

Le niveau hydrique apparaît dans la clé comme un élément déterminant de la station pour apprécier les choix d'essences et les potentialités. En revanche, la difficulté pour l'estimer a amené le rédacteur à concevoir une clé intégrant la RUM et le drainage latéral. La RUM y est estimée de façon indirecte à partir de critères géomorphologiques. Le dire d'expert du terrain, et donc la subjectivité, y tient une place importante.

Une cartographie de la RUM au pas de 50m sur une telle zone pourrait avoir des apports déterminants pour les gestionnaires concernant :

- l'objectivité de l'estimation. La carte prédictive permet de diminuer la part du dire d'expert dans la caractérisation des stations,
- la possibilité d'automatiser la cartographie des stations forestières sur tout le territoire en utilisant la RUM et le niveau trophique au pas de 50m.

Le travail du forestier lors des inventaires de peuplements consiste alors contrôler la station forestière prédite (voir §8.2.2).

Une nouvelle approche des stations forestières dans les plaines et collines.

L'approche phytosociologique des typologies de station prédomine dans les plaines et collines. En parallèle, il serait cependant intéressant de développer des modèles déterministes de cartographie automatisable des stations à partir de paramètres modélisés et prédits. A titre

d'exemple, les écologues et les modélisateurs ont à leur disposition de nombreuses données au pas de 50m en Lorraine : pH, RUM, position topographique, ...

Les données précédemment citées suffisent actuellement pour caractériser les stations en zone montagneuse, car les gradients sont bien marqués. En revanche, pour caractériser les plaines et collines, la texture dominante du profil et la profondeur d'hydromorphie resteraient encore à modéliser pour affiner le modèle (surtout pour le plateau lorrain). Ces données manquantes pourraient être potentiellement prédites techniquement à l'échelle de la Lorraine à partir des données déjà disponibles (IFN, BRGM, IGN, ...).

A terme, la possibilité d'avoir l'ensemble des données nécessaires pour modéliser les stations ouvre de nouvelles perspectives sur :

- l'exhaustivité de la couverture en cartographie de stations forestières, surtout en forêt privée où la donnée est peu disponible,
- l'évaluation de la sensibilité de chaque station vis-à-vis des changements climatiques grâce à la carte de la RUM au pas de 50m. Cette évaluation du risque n'est possible qu'en retenant la RUM comme caractéristique déterminante directement dans les clés des stations. Ainsi, comme dans l'exemple pris au §8.1.2, la capacité de stockage de l'eau dans le sol indique la sensibilité face aux changements climatiques.

Au final, on pourrait aboutir à une modélisation au pas de 50m du type :

- en zone de montagne : Etage bioclimatique + niveau trophique + RUM + topographie,
- en zone de plaines et collines : niveau trophique + RUM + position topographique + texture dominante du profil + hydromorphie.

Il s'agit d'hypothèses de modélisation avec des variables fréquemment utilisées dans les catalogues.

Selon les zones concernées, le fait de distinguer la texture ou l'hydromorphie n'est pas forcément utile, par exemple dans les plateaux calcaires. En effet, la texture est généralement limono-argileuse à argilo-limoneuse et il n'y a pas d'hydromorphie, donc ces deux paramètres supplémentaires ne sont pas discriminants pour la caractérisation des stations forestières.

Enfin, pour mieux appréhender le niveau trophique, il serait intéressant de coupler le pH à d'autres paramètres tels que C/N ou S/T (Curt et al, 2001). Mais cela nécessite de disposer également de ces deux données au pas de 50m pour automatiser les stations.

8.2 Vers une nouvelle approche de la gestion forestière

8.2.1 La RUM à haute résolution comme outil de prédiction et de spatialisation d'autres données forestières à haute résolution

L'eau est un paramètre essentiel dans la compréhension de la distribution et de la croissance des essences. Le fait de disposer dès à présent d'une carte des RUM et des déficits hydriques estivaux au pas de 50m pour la Lorraine apporte de nouvelles perspectives pour les modélisateurs et les gestionnaires.

La RUM et le déficit hydrique estival à fine résolution permettent déjà d'analyser et de modéliser pour une large échelle les relations avec :

- l'indice de fertilité, étude réalisée pour le Douglas dans le Massif Central (Curt et al, 2001),
- la répartition des essences, études réalisées notamment pour l'épicéa, le sapin, le hêtre et le chêne sessile (Piedallu et al, 2009).
- la productivité, étude réalisée pour l'ensemble des essences de l'arc alpin (Kunstler et al, 2011),

Pour ces études, l'apport de la RUM et du déficit hydrique estival au pas de 50m est double :

- il permet d'affiner les valeurs utilisées pour les études utilisant la RUM ou le déficit hydrique estival au pas de 500m (amélioration du modèle de RUM),
- il permet de spatialiser avec précision les phénomènes modélisés.

Une des applications possibles de la cartographie de la RUM à haute résolution a déjà été montrée dans cette étude avec la spatialisation du déficit hydrique estival, calculé à partir de la RUM (voir §8.1.2). C'est une variable essentielle dans la compréhension des contraintes hydriques et dans la perspective des changements climatiques.

La modélisation de la répartition des essences est fondamentale pour étudier les effets des changements climatiques. La RUM est souvent utilisée comme variable pour simuler les aires de répartition. Le fait de descendre le pas à 50m permet de mieux étudier les variations locales de RUM.

La spatialisation de l'indice de fertilité est particulièrement utile pour les gestionnaires. L'étude menée pour le Douglas (Curt et al, 2001) montre que l'indice de fertilité de cette essence dans le Massif central est fonction de :

- la RUM,
- la richesse trophique (compilation de valeurs de pH, C/N et S/T),
- l'altitude,
- la position sur le versant par rapport à l'apport en eau ou au drainage,
- l'exposition.

Le fait de pouvoir disposer à court terme d'une carte de la RUM des sols au pas de 50m telle que celle présente dans cette étude ouvre de nouvelles perspectives. En reprenant les variables utilisées par T.Curt, il est serait alors possible de spatialiser un indice de fertilité du Douglas à haute résolution.

En lien avec les études réalisées par I.Seynave (2005, 2008), une telle spatialisation de l'indice de fertilité à haute résolution serait alors possible pour le hêtre et l'épicéa.

8.2.2 L'utilisation de ces nouveaux outils fait évoluer l'approche de l'aménagement forestier mais nécessite une simplification et une vulgarisation pour faciliter le transfert des connaissances à la gestion

A l'aide de 4 descripteurs, un contexte forestier peut être décrit à haute résolution de façon synthétique avec la station forestière, la surface terrière, la fertilité du peuplement et le déficit hydrique estival. Sur ces 4 descripteurs, compte tenu des techniques actuellement disponibles :

- le déficit hydrique estival peut d'ores et déjà être fourni au pas de 50m,

- la fertilité pourrait être prédite au pas de 50m en utilisant la cartographie prédictive, pouvant notamment être couplée avec la méthode LIDAR,
- les stations forestières pourraient être prédites au pas de 50m à l'échelle de la Lorraine en utilisant des modèles tels que celui conçu pour les Vosges (Gegout et al, 2006),
- seule la surface terrière (G), ne peut pas être prédite compte tenu des techniques actuelles car elle dépend avant tout de la sylviculture et des aléas naturels.

Il ne s'agit pas d'exclure le forestier de la forêt, au contraire. Une campagne de terrain pour la préparation d'un aménagement forestier pourrait alors s'axer sur :

- la mesure de la surface terrière,
- la validation de données prédites par le regard d'expert du forestier pour les autres données (station forestière, fertilité, ...).

Tout en conservant son niveau de précision, le temps d'inventaire pourrait être réduit. Ce gain de temps permettrait ensuite de mieux suivre l'application des aménagements et les peuplements dans le contexte de changement climatique qui impose de la réactivité aux forestiers.

La carte est un outil fréquemment utilisé par les gestionnaires. La mise en place du logiciel cartographique Canopée à l'ONF permettrait même aux personnels de terrain d'avoir directement la donnée en consultation sur leur ordinateur.

L'autre avantage de cette nouvelle approche est que les cartographies sont prédictives. C'est-à-dire que, à partir des valeurs actuelles des variables, on peut prédire le déficit hydrique estival, et bientôt la station forestière et la fertilité à court (15 ans), moyen (30 ans) ou long terme (100 ans). Le paramétrage étant variable, les scénarios de changement climatique peuvent être intégrés directement pour prédire leur évolution. A partir des prédictions, des scénarios de gestion peuvent être réalisés pour l'aide à la décision dans les aménagements forestiers en fonction du changement induit et du risque évalué.

L'objectif n'est pas d'imposer aux forestiers de devenir des analystes informatiques, on perdrait alors tout le sens des apports de la recherche ... Trop d'informations noierait le gestionnaire qui perdrait alors l'essentiel nécessaire pour l'aide à la gestion.

Le but fixé est de continuer à améliorer les connaissances tout en conservant la simplicité de gestion. Le rapprochement entre la recherche et les gestionnaires est alors crucial, c'est la condition de la réussite. Les services de développement ont alors un rôle central.

L'exemple de la RUM et du déficit hydrique estival est ainsi un bon exemple. Sur la base de l'analyse réalisée par JB Richard, et à partir d'un nombre important de variables disponibles (Précipitations, températures, ETP, RUM, ...) on ne retient qu'un seul paramètre synthétique pour caractériser la contrainte hydrique et faciliter l'aide à la décision pour le gestionnaire.

8.2.3 Une approche à étendre à l'ensemble des régions

Dès lors que la méthodologie et les données sont potentiellement disponibles pour l'ensemble des régions métropolitaines, la carte de la RUM au pas de 50m peut progressivement couvrir toute la France.

Une nécessité pour l'ensemble des acteurs

Les **politiques et les financeurs** ont besoin de critères quantifiés, factuels et sur une large échelle pour faire des prospectives, orienter leur stratégie et optimiser l'attribution de financements. Ce besoin est d'autant plus important aujourd'hui avec l'incertitude liée aux changements climatiques. Des investissements et des actions sont à réaliser mais, devant l'ampleur potentielle du phénomène, il est nécessaire de cibler les décisions.

Les **chercheurs** disposent d'outils cartographiques et statistiques de plus en plus performants. La contrainte pour la modélisation est alors de disposer de variables explicatives performantes, exhaustives et facilement accessibles.

Les **gestionnaires**, actuellement dans l'incertitude des changements climatiques, ont besoin d'outils permettant d'estimer l'adéquation essence/station et le risque de dépérissement. Le fait de disposer de cartes à haute résolution permet de spatialiser le phénomène et d'ajuster finement les décisions.

Dans ce contexte, le fait de pouvoir disposer pour l'ensemble des acteurs d'une carte de la RUM au pas de 50m sur toutes les régions représenterait ainsi un apport décisif en disposant d'une donnée :

- qui permet d'améliorer les modèles de sensibilité des essences aux risques climatiques, et donc de faire des prospectives avec une meilleure précision,
- qui, combinée à d'autres variables (ex : précipitations, températures), peut fournir une information complémentaire sur l'adéquation entre essence et station à partir de données synthétiques (ex : déficit hydrique estival). Ainsi, il est possible de restreindre plus finement l'utilisation de certaines essences et définir le risque inhérent,
- qui peut être finement spatialisée sur une carte à haute résolution. Il est alors possible de bien préciser géographiquement les actions à entreprendre.

Un exemple de projet possible en Midi-Pyrénées

D'après les prévisions, Midi-Pyrénées semblerait parmi les régions les plus concernées par les changements climatiques en France (Roman-Amat, 2007). Des dépérissements importants ont déjà été relevés sur l'épicéa et le douglas du Sud Massif Central, sur le sapin des Pyrénées et sur le chêne pédonculé des plaines et collines de l'Adour. A ce titre, une carte des RUM au pas de 50m à l'échelle de la Région permettrait ainsi de mieux comprendre et modéliser les phénomènes.

Disposer d'une carte de la RUM au pas de 50m est un enjeu fort pour Midi-Pyrénées. Si le montage du dossier devient trop compliqué, l'urgence est avant tout de concentrer l'effort sur le Sud Massif Central, là où les besoins sont les plus immédiats. Pour cette raison, le projet peut aussi faire l'objet de plusieurs tranches.

Il est intéressant de pouvoir coupler la carte de la RUM avec l'étude des dépérissements et de l'évolution climatique en Midi-Pyrénées. Pour cette raison, l'ESA Purpan (spécialisée notamment dans l'analyse de photos satellites) et Météo-France sont à associer au projet.

Une autre possibilité est d'intégrer l'ensemble des Pyrénées, en rajoutant les Pyrénées Orientales et les Pyrénées-Atlantiques. En effet, les enjeux de protection sont forts sur toute la zone pyrénéenne. Les dépérissements actuels, notamment sur le pin sylvestre dans les

Pyrénées-Orientales, peuvent remettre en cause le rôle de protection de ces forêts de montagne.

9 Conclusion

Le fait d'intégrer la géologie au 1/50 000 en plus des variables topographiques a permis, à l'échelle du Nord-Est de la France, d'améliorer le modèle de réserve utile maximale des sols forestiers avec un $R^2 = 0,54$ pour le jeu de validation. Compte tenu de la précision des variables utilisées, le pas de cartographie a pu être abaissé à 50m au lieu de 500m auparavant.

La carte de la RUM au pas de 50m permet maintenant au gestionnaire :

- d'utiliser à l'échelle de la forêt une carte des RUM à haute résolution,
- de bénéficier d'une carte de la RUM dont l'échelle est compatible avec les inventaires de terrain réalisés, notamment au moment de l'élaboration des aménagements forestiers.

La RUM au pas de 50m permet également aux modélisateurs de produire d'autres données à haute résolution. Ainsi, pour mieux appréhender les causes et les conséquences des changements climatiques, une carte du déficit hydrique estival a également pu être produite au pas de 50m. Ce type de donnée est alors très utile au gestionnaire pour compléter et affiner les typologies forestières existantes.

La présente étude est la première réalisée à haute résolution en France à l'échelle d'une région et pour des sols forestiers. Dans la perspective d'étendre ce travail, il existe différents niveaux d'amélioration de l'approche :

- affiner la précision de la mesure de la RUM sur les placettes de référence,
- intégrer de nouvelles variables topographiques dans le modèle pour mieux prendre en compte les erreurs liées aux limites de couches géologiques,
- utiliser un jeu de validation complet et indépendant, l'idéal serait de pouvoir bénéficier des données de RUM de l'IFN non floutées.

La validation sur le site de Bois l'Evêque – Villey le sec a permis de montrer que l'utilisation de la carte de la RUM au pas de 50m est possible à l'échelle de la forêt ou d'un groupe de parcelles. En revanche, la précision est moins bonne à l'échelle de la parcelle.

Qu'on le veuille ou non, le SIG et la modélisation sont devenus incontournables pour la gestion forestière. Ils ne remplacent pas la nécessaire vision d'expertise de terrain mais deviennent une référence complémentaire essentielle.

Ces nouveaux outils offrent des possibilités importantes d'utilisation et de développements qu'il reste maintenant à rendre accessible et vulgariser pour faciliter le transfert de connaissances aux gestionnaires. Devant les nombreuses possibilités d'utilisation, la cartographie de la RUM au pas de 50m doit se poursuivre dans d'autres régions.

La perspective des changements climatiques est alors une occasion importante pour rapprocher les gestionnaires, en pleine incertitude, et les chercheurs, qui ont maintenant la possibilité de développer des outils de plus en plus précis.

10 Bibliographie

- Berges, L., Balandier, P., 2009. Revisiting the use of soil water budget assessment to predict site productivity of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in the perspective of climate change. *Eur J Forest Res.* DOI 10.1007/s10342-009-0315-1.
- Bishop, T. F. A., A. B. McBratney. 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma* 103: 149-160.
- Bourennane H., D. King, A. Couturier. 2000. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. *Geoderma* 97: 255-271.
- Cantat, O., P. Le Gouée, A. Bensaid, E.Savouret. 2010. Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. 23ième Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes.
- Carré F., A. B. McBratney, T. Mayr, L. Montanarella. 2007. Digital soil assessments: Beyond DSM. *Geoderma* 142: 69-79.
- Curt, T. 1989. Typologie forestière de la bordure Sud-Ouest du Massif Central – Eléments pour le choix des essences. CEMAGREF Clermont-Ferrand.
- Curt, T., Bouchaud, M., Agrech, G., 2001. Predicting site index of Douglas-Fir plantations from ecological variables in the Massif Central area of France. *Forest Ecology and Management* 149, 61–74.
- Drapier, J., Cluzeau, C., 2001. La base de données écologiques de l'IFN. The NFI's ecological data base. *Revue Forestière Française* 53, 365–371.
- Dupuy, E. 2008. Modélisation et cartographie des réserves utiles maximales de France. Module ASTEC. AgroParisTech-ENGREF. Nancy, France.
- Emberger, C. 2010. De la modélisation à la cartographie à large échelle des sols forestiers : vers une amélioration de l'estimation des potentialités forestières. Rapport de stage. INRA Avignon. 55p.
- Franc, A. 1989. Le Massif Central cristallin – Analyse du milieu – Choix des essences. CEMAGREF Clermont-Ferrand.
- Franklin, J. 1995. Predictive vegetation mapping: geographic modeling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography* 19(4): 474-499.
- Gégout, J.C., C.Coudun. 2005. EcoPlant: A forest site database linking floristic data with soil and climate variables, *Journal of vegetation science*, Vol. 16, n° 2, 2005, p. 257-260.
- Gégout, J. C., C. Piedallu, J. F. Cornu, C. Cluzeau. 2008. La cartographie prédictive des stations forestières: un nouvel outil au service du gestionnaire. *Revue Forestière Française* IX: 37-60.

Guisan A, Zimmermann NE (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol Modell* 135:147–186.

Jousse, C. 2008. Modélisation et cartographie des réserves utiles maximales (RUMs) des sols vosgiens. Module ASTEC. AgroParisTech-ENGREF. Nancy, France.

Kalivas, D. P., D. P. Triantakostas, V. J. Kollias. 2002. Spatial prediction of two soil properties using topographic information. *Global Nest: The International Journal* 4(1): 41-49.

Kunstler, G., C. H. Albert, B. Courbaud, S. Lavergne, W. Thuiller, G. Vieilledent, N. E. Zimmermann et D. A. Coomes. 2011. Effects of competition on tree radial-growth vary in importance but not in intensity along climatic gradients. *Journal of Ecology*. Vol 99.

Lebourgeois, F., Piedallu, C., 2005. Comment appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière ? Notion d'indices bioclimatiques, méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. *Revue Forestière Française*, LVII, volume 4/2005: p331-356.

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolstrom, M., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259 (2010) 698–709.

McBratney, A. B., I. O. A. Odeh, T. F. A. Bishop, M. S. Dunbar, T. M. Shatar. 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97: 293-327.

McBratney A .B., M.L. Mendonça Santos, B. Minasny. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117 : 3-52.

Nebout, JP. 2010. Évaluer la réserve en eau utile des sols forestiers à la tarière hydraulique. *Forêt Entreprise* n°196, janvier 2010.

Pachepsky Y. A., D. J. Timlin, W.J. Rawls. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society American Journal* 65: 1787-1795.

Palmer, W. C. 1965. Meteorological drought. Office of Climatology,. Washington D.C., Weather Bureau.

Piedallu, C., V. Perez, J.C. Gegout, F. Lebourgeois, R. Bertrand. 2009. Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française*.

Piedallu, C., J. C. Gégout, J. F. Cornu, et C. Cluzeau. 2006. Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien. Elaboration, validation et applications. Convention de recherche ECOFOR/ENGREF n°2000.43. Convention de recherche SERFOB Lorraine (DRAF)/ENGREF-IFN. Nancy. Francia. pp.91.

Piedallu, C., Kochert, T., Riofrio-Dillon, G., Staub, J., Messant, D., Asael, S., Serrate, D., Perez, V., Pierrat, J.C., Jabiol, B., Lecocq, M., Frémont, J.M., 2010. Assurer une récolte

raisonnée des rémanents en forêt, Rapport final – Projet 8 de la politique de qualité PEFC Lorraine 2007-2012. 46p.

Piedallu, C., Gégout, J., Bruand, A., Seynave, I., 2010a. Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma*, doi:10.1016/j.geoderma.2010.10.004.

Piedallu, C., Lebourgeois, F., Gégout, J.C., Seynave, I., Vepierre, R., Cluzeau, C., Nédeltcheva, T., Bruno, E., Badeau, V., 2007. Développement, spatialisation, et validation d'indices bioclimatiques, ENGREF-IFN-INRA.

Piedallu, C., 2010b. Carte numérique de la RUM des sols forestiers de France au pas de 500m, LERFOB.

Richard, J. B, 2011. Caractérisation de la contrainte hydrique des sols pour prendre en compte les effets des changements climatiques dans les stations forestières, Agroparistech-engref.

Riofrio-Dillon, G., 2010. Predictive mapping of pH at fine resolution at regional scale. Agroparistech-engref, Rapport de stage. 19p.

Robbez-Masson, J.M., Barthes, J.P., Bornand, M., Falipou, P., Legros, J.P., 2000. Bases de données pédologiques et systèmes d'informations géographiques. L'exemple de la région Languedoc-Roussillon. *Forêt méditerranéenne*, t. XXI, n°1 mars 2000.

Roman-Amat, B. 2007. Préparer les forêts françaises au changement climatique : Rapport à MM les Ministres de l'Agriculture et de la Pêche et de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables.

Sanchez, P.A, Ahamed, S., Carré, F., Hartemink, A.E., Hempel, J., Huising, J., Lagacherie, P., McBratney, A.B., McKenzie, N.J., Mendonça-Santos, M.L., Minasny, B., Montanarella, L., Okoth, P., Palm, C.A., Sachs, J.D., Shepherd, K.D., Vågen, T.G., Vanlauwe, B., Walsh, M.G., Winowiecki, L.A., Zhang, G.L., 2009. Digital soil map of the world. *Science* 325:680–681.

Schloeder, C. A., N. E. Zimmerman, M. J. Jacobs. 2001. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. *Soil Science Society American Journal* 65 : 470-479.

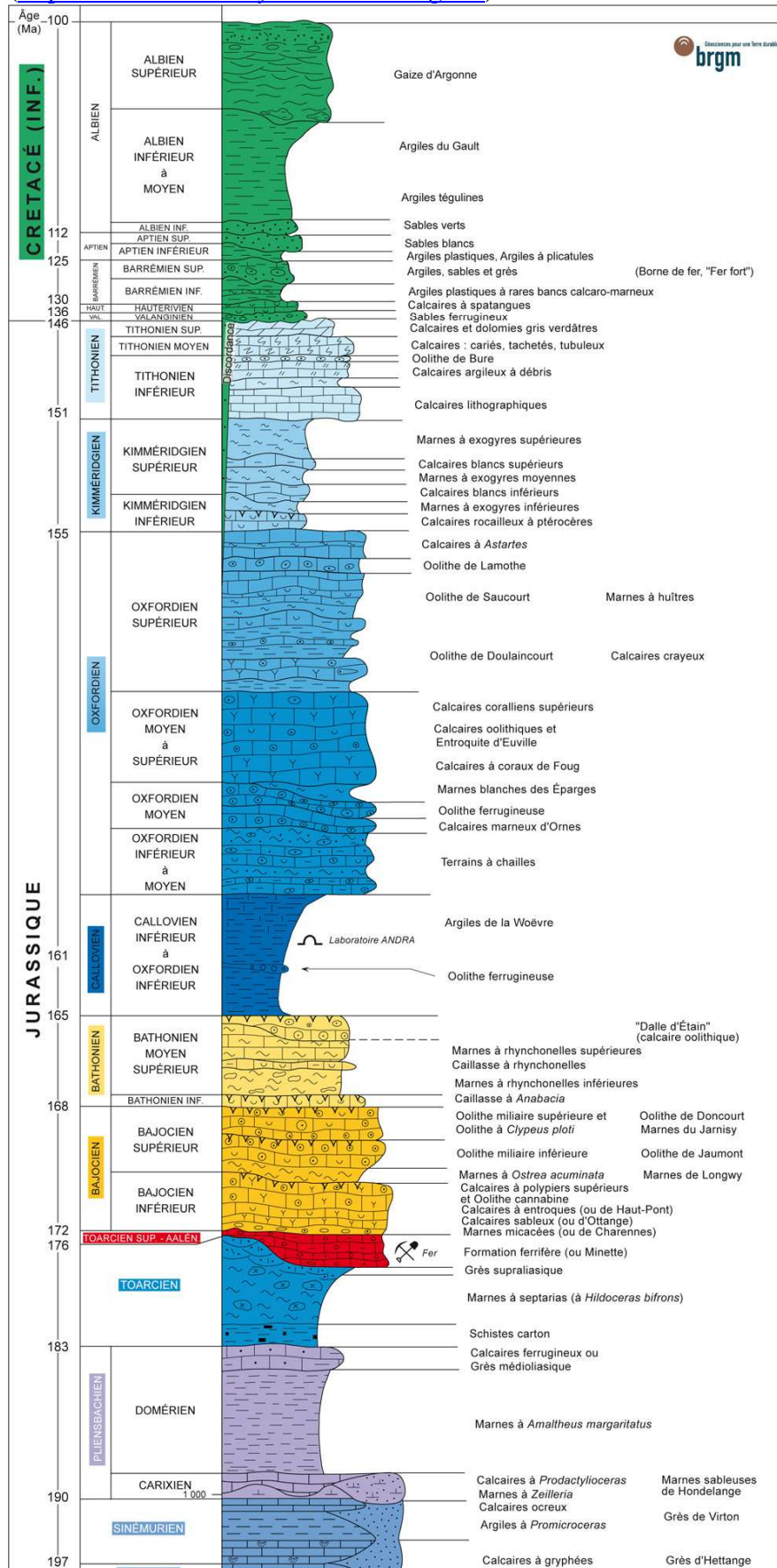
Schmidt, J., Hewitt, A., 2004. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. *Geoderma* 121 (2004) 243–256.

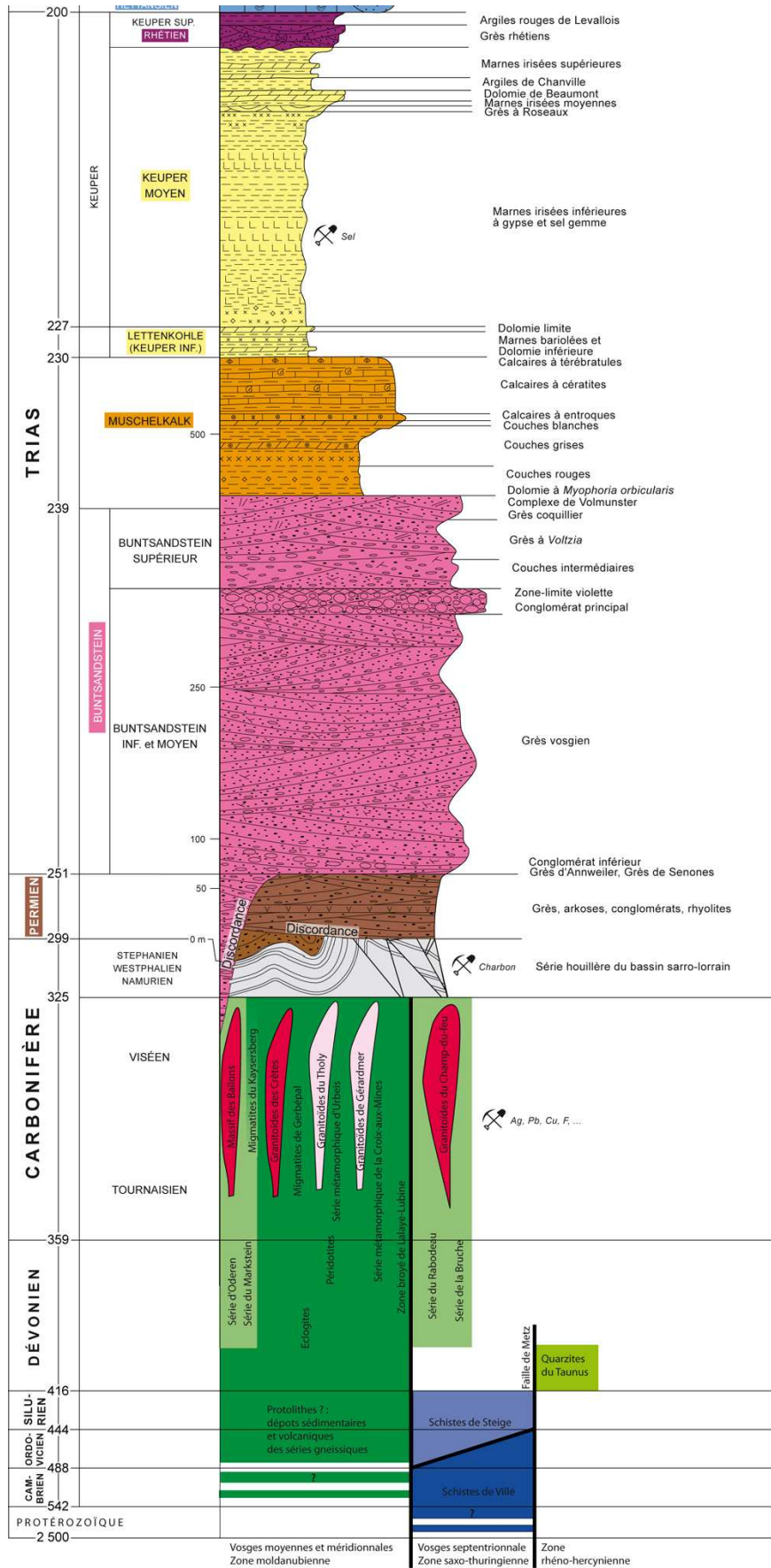
Scull, P.; J. Franklin, O.A. Chadwick & D. McArthur. 2003. Predictive soil mapping - a review. *Progress in Physical Geography (Sage Publications)* 27 (2): 171–197.

Thornthwaite, C. W. et Mather, J. R. (1955). The water balance. Laboratory of Climatology, Publication in Climatology. n°8.

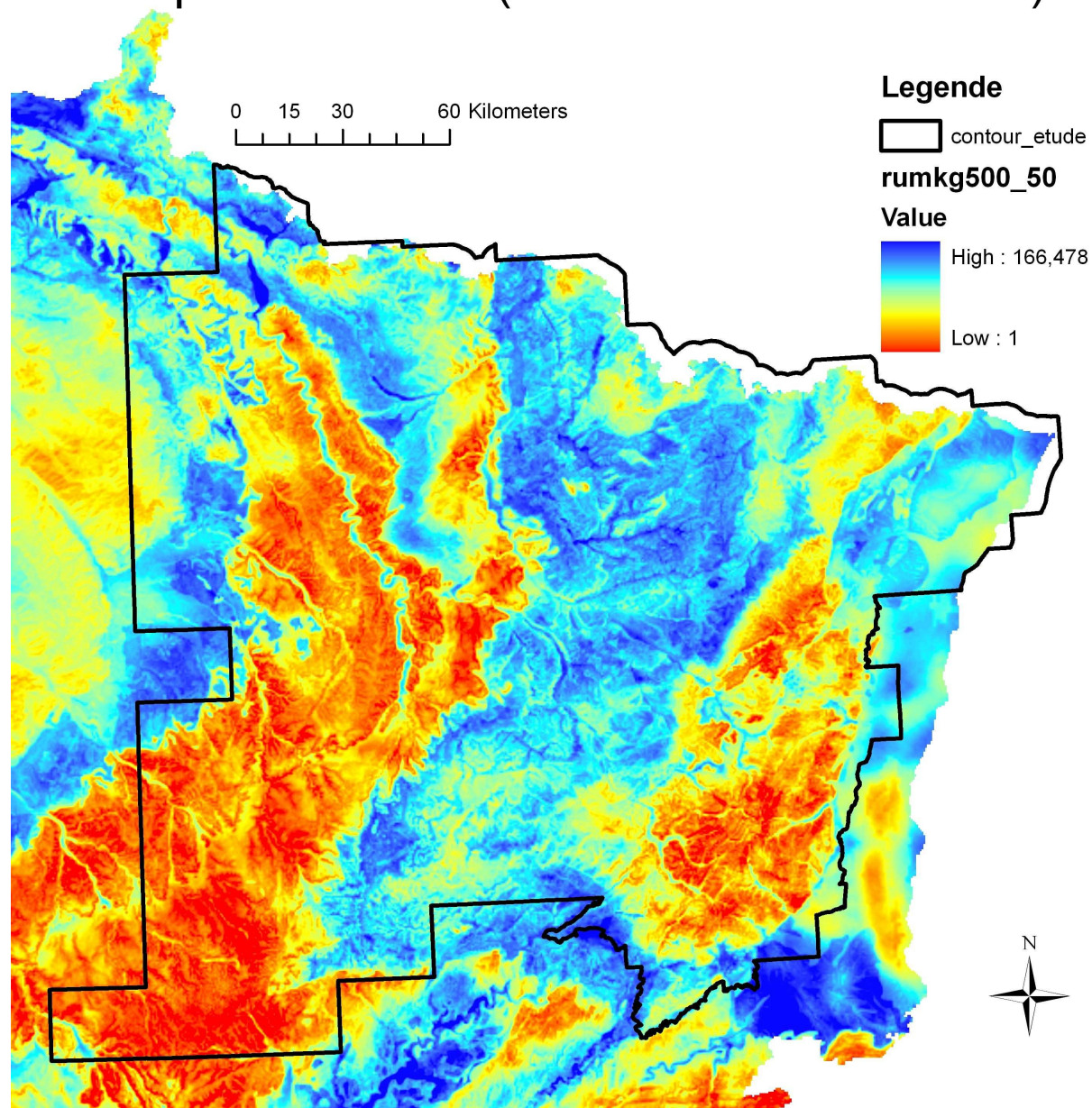
ANNEXE 1 : LOG STRATIGRAPHIQUE DE LA LORRAINE

(<http://www3.ac-nancy-metz.fr/base-geol/>)





Carte de la RUM des sols forestiers au pas de 500m (Nord-Est de la France)



ANNEXE 3 : CLE DES STATIONS FORESTIERES DE LA BORDURE SUD-OUEST DU MASSIF CENTRAL (CURT, 1989)

TABEAU RECAPITULATIF DES STATIONS

MATERIAUX	1 - SABLEUX			2 - LIMONEUX			3 - ARGILEO-LIMONEUX		
	arènes sabieuses arènes gréissiques	arènes sabieuses ou micascchisteuses formations limoneuses à blocs sur granite/gneiss colluvions	altérites schisteuses ou micascchisteuses formations limoneuses à blocs sur granite/gneiss colluvions	alt. schisteuses ou micascchisteuses form. limoneuses à blocs sur granite/ gneiss	alt. schisteuses ou micascchisteuses formations limoneuses à blocs sur granite/gneiss colluvions	altérites schisteuses ou micascchisteuses formations limoneuses à blocs sur granite/gneiss			
NIVEAU TROPHIQUE	11- Oligotrophe	12- Hyperoligotrophe	21- Eutrophe-mésotrophe	22- Oligotrophe	23- Hyperoligotrophe	31- Eutrophe-mésotrophe	32- Oligotrophe		
SOLS	Soi brun acide Soi brun ocreux Soi ocre podzolique	Ranker de pente Ranker cryptopodzolique Podzol humo- ferrugineux	Soi brun eutrophe Soi brun mésotrophe Soi brun colluvial (eutrophe, mésotrophe)	Soi brun acide Soi brun ocreux Soi ocre podzolique Soi brun faiblement lessivé	Ranker de pente Ranker cryptopodzolique Podzol humo- ferrugineux	Soi brun eutrophe Soi brun mésotrophe Soi brun colluvial (eutrophe, mésotrophe)	Soi brun acide Soi brun ocreux Soi ocre podzolique Soi brun faiblement lessivé		
HUMUS	mul. acide, mul.-moder, moder	moder-mor, mor	mul. eutrophe mul. mésotrophe	mul. acide, mul.-moder, moder	moder-mor, mor	mul. eutrophe mul. mésotrophe	mul. acide, mul.-moder moder		
TOPOGRAPHIE	Toutes situations	Plateaux, crêtes	Plateaux, bas de versants	Toutes situations	Plateaux, crêtes	Plateaux, bas de versants	Toutes situations		
RESERVE EN EAU	Faible Moyenne Forte	Faible Moyenne Forte	Moyenne Forte	Faible Moyenne Forte	Faible Moyenne Forte	Moyenne Forte	Faible Moyenne Forte		
STATIONS	121 122 123	133 134	211 212 213 214 215	221 222 223 224 225 226 227	231 232	311 312 313 314	321 322 323 324 325 326		

Résumé :

Une cartographie prédictive de la réserve utile maximale des sols forestiers a été réalisée au pas de 50m pour le Nord-Est de la France. Des covariables géologiques et topographiques ont été utilisées pour élaborer le modèle statistique. La validation de la carte a permis de définir la précision et les limites d'utilisation pour le gestionnaire. Des améliorations sont proposées pour perfectionner la qualité prédictive du modèle. Dans la perspective des changements climatiques, la carte de la réserve utile maximale est une donnée très utile pour le gestionnaire et les usages possibles sont listés. Le travail pourrait alors être étendu sur d'autres régions.