



**HAL**  
open science

## Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques

Christian Piedallu, François F. Lebourgeois, Jean-Claude Gégout, Ingrid  
Seynave, Romain Vepierre, Catherine Cluzeau, T. Nedeltcheva, Vincent  
Badeau

► **To cite this version:**

Christian Piedallu, François F. Lebourgeois, Jean-Claude Gégout, Ingrid Seynave, Romain Vepierre, et al.. Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques. [Rapport de recherche] ign. 2007. hal-00835912

**HAL Id: hal-00835912**

**<https://hal.science/hal-00835912>**

Submitted on 20 Jun 2013

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

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

CONVENTIONS DE RECHERCHE 2005.18 et 2005.19

Projet Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques

Rapport final

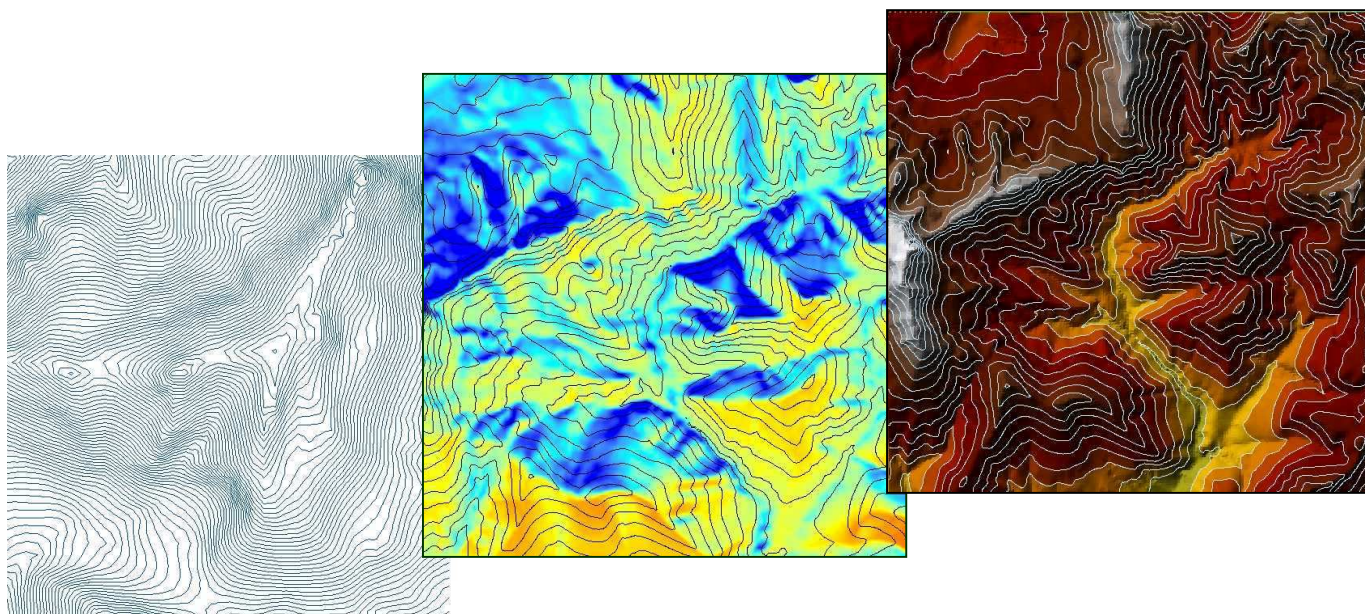
9 octobre 2007

ENGREF-IFN-INRA

*Piedallu C., Lebourgeois F., Gégout J.C., Seynave I., Vepierre R.  
LERFOB – AgroParisTech-ENGREF - Nancy*

*Cluzeau C., Nédeltcheva T., Bruno E., IFN*

*Badeau, V. EEF – INRA - Nancy*



1	Rappel des objectifs.....	3
2	Calculs d'Indices topographiques .....	4
	<i>(travail réalisé par l'IFN et l'INRA, avec la collaboration de l'ENGREF qui a mis au point et calculé l'indice de position topographique, et correspondant au point 5.2.1 de la convention)</i> .....	4
2.1	Estimation de l'altitude des points lfn.....	4
2.2	Comparaison des valeurs de pente lfn et MNT .....	5
2.3	Comparaison des valeurs d'exposition lfn et MNT .....	6
2.4	Comparaison de la topographie appréciée sur le terrain par l'lfm et modélisée par le Lerfob (modèle POSITOPO).....	7
2.5	Conclusion .....	9
3	Estimation du rayonnement solaire global .....	9
	<i>(travail correspondant au point 5.2.2 de la convention)</i> .....	9
3.1	Calcul du rayonnement avec le modèle Solar Analyst (réalisé par l'IFN).....	9
3.1.1	Présentation de Solar analyst.....	9
3.1.2	Paramétrage de Solar Analyst.....	10
3.2	Elaboration d'un modèle de rayonnement multi-échelles : Helios (réalisé par l'ENGREF) ....	11
3.2.1	Méthode de calcul du rayonnement solaire .....	13
3.2.2	Sensibilité du modèle Helios.....	16
3.3	Intégration des données satellitaires de rayonnement : SATMOS (réalisé par l'INRA) .....	18
3.3.1	Généralités.....	18
3.3.2	Traitement des images .....	18
4	Les indices bioclimatiques .....	19
4.1	Calculs et spatialisation des indices climatiques (réalisé par l' ENGREF) .....	19
4.1.1	Indice d'aridité de De Martonne.....	19
4.1.2	Quotient pluviothermique d'Emberger .....	20
4.1.3	Angle de continentalité hydrique de Gams modifié par Michalet .....	21
4.1.4	Calcul de l'ETP .....	22
4.2	Prise en compte de la réserve utile des sols dans le calcul du bilan hydrique (réalisé par l' ENGREF, collaboration de l'IFN pour la fourniture des données relevées sur ses points d'inventaire)	26
4.2.1	Calcul de la réserve utile maximale des sols.....	26
4.2.2	Calcul des bilans hydriques édaphiques .....	36
4.2.3	Méthode de calcul.....	36
4.2.4	Production de cartes et d'indices à partir du calcul de bilan hydrique édaphique.....	38
4.2.5	Conclusion quant au calcul des indices bioclimatiques.....	41
5	Validité des indices.....	41
5.1	Comparaison et validation des indices de rayonnement solaire et de bilans hydriques climatiques .....	41
5.1.1	Validation et comparaison des calculs de rayonnement solaire.....	42
5.1.2	Validation et comparaison des calculs de bilans hydriques à l'aide de données mesurées (réalisé par l'ENGREF, point 5.3.1 de la convention) .....	47
5.1.3	Capacité prédictive du rayonnement solaire et des bilans hydriques climatiques (réalisé par l'ENGREF) .....	50
5.1.4	Analyse du degré de complexité nécessaire pour bien modéliser le rayonnement solaire (réalisé par l'ENGREF).....	54
5.1.5	Conclusion générale concernant le calcul du rayonnement solaire et des bilans hydriques (ENGREF) .....	61
5.2	Validation des calculs de réserve utile maximale des sols .....	62
6	Relation entre les indices calculés et la flore .....	64
6.1	Lien entre les indices créés et la flore forestière Française (ENGREF) .....	64
6.1.1	Réalisation d' une AFC sur la France entière.....	65
6.1.2	Corrélation entre les indices calculés sous SIG et les axes F1 et F2 de l'AFC .....	65
6.2	Pertinence de ces indices vis-à-vis de la fertilité de plusieurs essences forestières (réalisation ENGREF) .....	68
6.3	Caractérisation des étages de végétation à l'aide des indices bioclimatiques (IFN).....	69
6.3.1	Caractéristiques des 3002 points et des 3 étages prédéterminés .....	71
6.3.2	Essences principales les plus fréquentes par étage .....	74
6.3.3	Résultats de l'analyse discriminante des étages de végétation .....	76
7	Conclusion générale.....	78

## 1 Rappel des objectifs

L'organisation de relevés de terrain structurés sous forme de bases de données permet de contribuer à l'établissement d'une typologie nationale des stations forestières. L'utilisation de ces bases de données permet de mieux connaître l'écologie des espèces, et d'établir un lien entre les paramètres stationnels et la présence ou la fertilité des différentes essences. Pour l'IFN, cela se traduit d'une part par l'acquisition de nombreux relevés écologiques sur le terrain, et d'autre part par l'animation et la coordination depuis 2002 du programme de relance de la typologie des stations forestières en France. L'objectif principal de ce travail est de mettre à disposition des gestionnaires forestiers des outils permettant de les guider dans leurs choix sylvicoles. L'ENGREF travaille depuis le début des années 90 à la création d'une base de données combinant relevés phytoécologiques et analyses de sols (EcoPlant), et depuis 2000 à la cartographie des stations forestières à partir de modèles élaborés avec des données spatialisées (Gégout et al., 2006). Les cartes prédictives des stations forestières permettent d'appréhender les conditions stationnelles sur de vastes emprises et à l'échelle locale (pixels de 50 mètres de côté), et ont vocation à devenir un nouvel outil au service des gestionnaires, en complément des relevés de terrain qu'ils permettent de simplifier. Ces travaux nécessitent l'élaboration d'indices permettant de caractériser les principaux facteurs écologiques ayant une action sur la végétation. L'IFN a commencé à développer, à partir des données relevées sur ses placettes, un ensemble d'indices stationnels qui permettent de décrire, en un point, l'acidité du substrat, les apports latéraux en eau (indice basé sur la topographie), l'engorgement de sols, les niveaux trophique et hydrique basés sur la végétation, (Bruno et Bartoli, 2001), le rayonnement (d'après les abaques de (Becker, 1979)), auxquels s'ajoutent le type d'humus défini directement sur le terrain. Cependant, ces indices ne peuvent être calculés que sur un relevé de l'IFN, et ne sont pas suffisamment précis, en particulier dans les régions montagneuses. Ils ne permettent pas, par exemple, de définir les limites altitudinales des étages de végétation qui constituent souvent une entrée dans les typologies de stations forestières ou dans l'identification des habitats forestiers. L'ENGREF a pour sa part développé un certain nombre d'indices sous SIG caractérisant le niveau trophique, le bioclimat ou la réserve en eau des sols (Piedallu et al., 2006), mais ces données sont le plus souvent calculées localement, et parfois de façon très simplifiée. L'évolution des moyens techniques permet aujourd'hui d'améliorer les calculs spatialisés, à l'aide notamment des Modèles Numériques de Terrain et des modèles climatiques, permettant soit d'obtenir des informations plus précises que celles existantes, soit de se substituer à des mesures trop coûteuses ou difficiles à réaliser sur le terrain.

Le présent projet se propose de :

- calculer un ensemble d'indices sous SIG permettant d'enrichir les bases de données écologiques de l'IFN et de l'ENGREF, et d'améliorer la connaissance de l'écologie des espèces forestières. La mise à disposition de tels indices synthétiques faciliterait la création de typologies ou de cartographies des stations utilisables par les gestionnaires ;
- spatialiser les principaux indices bioclimatiques pour les rendre utilisables à différentes échelles (nationale, région, forêt, etc). Les indices seront calculés avec une résolution fine (pixels ayant entre 1 km et 50 m de côté) permettant une utilisation locale ;
- comparer des indices spatialisés et essayer d'identifier ceux qui semblent le plus pertinent;
- valider ces indices spatialisés grâce à des données mesurées ;
- tester la pertinence de ces différents indices spatialisés sur :
  - la flore forestière en tant que facteur expliquant sa répartition ;
  - la croissance en hauteur du hêtre et de l'épicéa dans deux grandes régions (à partir de l'indice de fertilité).

A l'échelle du territoire, les données numériques spatialisées utilisées pour ce projet sont les suivantes :

- les données de précipitations et de températures moyennes du modèle AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'Hydrométéorologie) de Météo France. Ces données sont disponibles au pas kilométrique et concernent les moyennes mensuelles trentenaires (1961-1990). Pour le praticien et le gestionnaire forestier, ces moyennes restent les données les plus utilisées dans la démarche d'analyse des contraintes stationnelles car elles permettent de travailler sur une période cohérente avec la gestion forestière ;
- le Modèle Numérique de Terrain au pas de 50 m (BD alti de l'IGN).

Les analyses développées dans ce projet sont basées sur l'utilisation de ces données spatialisées et des bases de données de l'IFN et de l'ENGREF. Nous allons développer chaque étape du travail réalisé, en faisant référence point par point au paragraphe de la convention qui est concerné, et en citant les acteurs concernés.

## **2 Calculs d'Indices topographiques**

*(travail réalisé par l'IFN et l'INRA, avec la collaboration de l'ENGREF qui a mis au point et calculé l'indice de position topographique, et correspondant au point 5.2.1 de la convention)*

Les valeurs d'altitude, de pente, d'exposition et les situations topographiques au niveau des points lfn ont été comparées aux valeurs extraites du MNT au pas de 50 m de l'IGN. Ces comparaisons ont été effectuées dans la région des Alpes élargies, caractérisée par une forte variation des altitudes. Cette zone comprend les départements de l'Ain (01), des Alpes de Haute-Provence (04), des Hautes-Alpes (05), des Alpes-Maritimes (06), de l'Ardèche (07), des Bouches-du-Rhône (13) de la Drôme (26), du Gard (30), de l'Isère (38), de la Loire (42), du Rhône (69), de la Savoie (73), de la Haute-Savoie (74), du Var (83) et du Vaucluse (84) et plus de 20 000 points lfn inventoriés entre 1993 et 2003.

### **2.1 Estimation de l'altitude des points lfn**

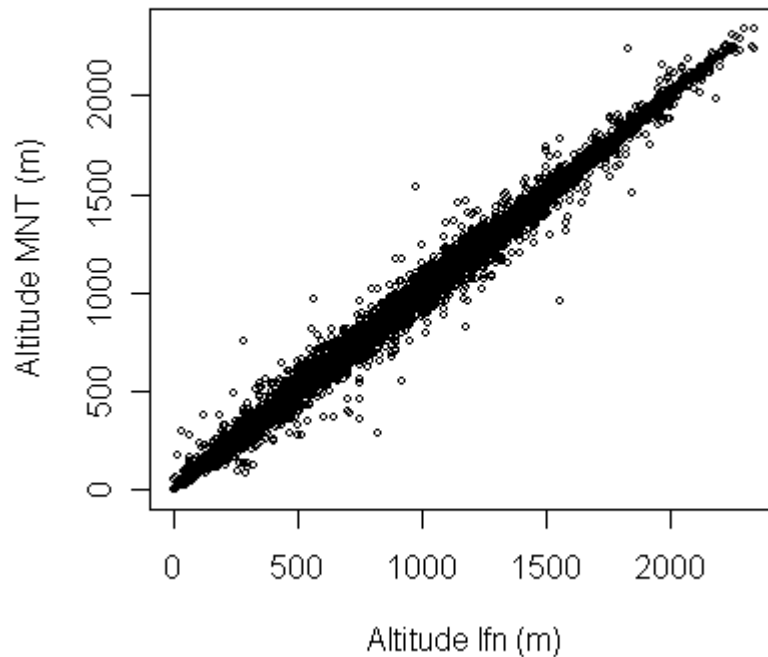
Les agents de terrain de l'Ifn notent l'altitude du point d'inventaire en se référant aux courbes de niveau de la carte IGN au 1/25 000. Il est envisagé de ne plus la faire noter par les agents de terrain mais de l'extraire du MNT (pas de 50 m).

Les points IFN ont été projetés sur le MNT de la France au pas de 50 m. Les altitudes des pixels correspondant à la position géographique des points ont été extraites.

La comparaison suivante porte sur 20 073 points lfn.

Il existe une forte corrélation entre les deux altitudes -  $R^2 = 0,9954$  (fig. 1). La différence moyenne entre les deux valeurs d'altitude (lfn – MNT) est de -0,0895 m. Un peu moins de 2 % des points ont un écart d'altitude supérieur à 100 m et 6,7 % ont un écart supérieur à 50 m. La différence entre les deux altitudes est inférieure à 10 m pour plus de la moitié des points (55 %).

L'utilisation de l'altitude issue du MNT dans la base de données lfn ne pose donc pas de problèmes.



**Figure 1** : comparaison des altitudes lfn et extraites du MNT (n= 20 073)

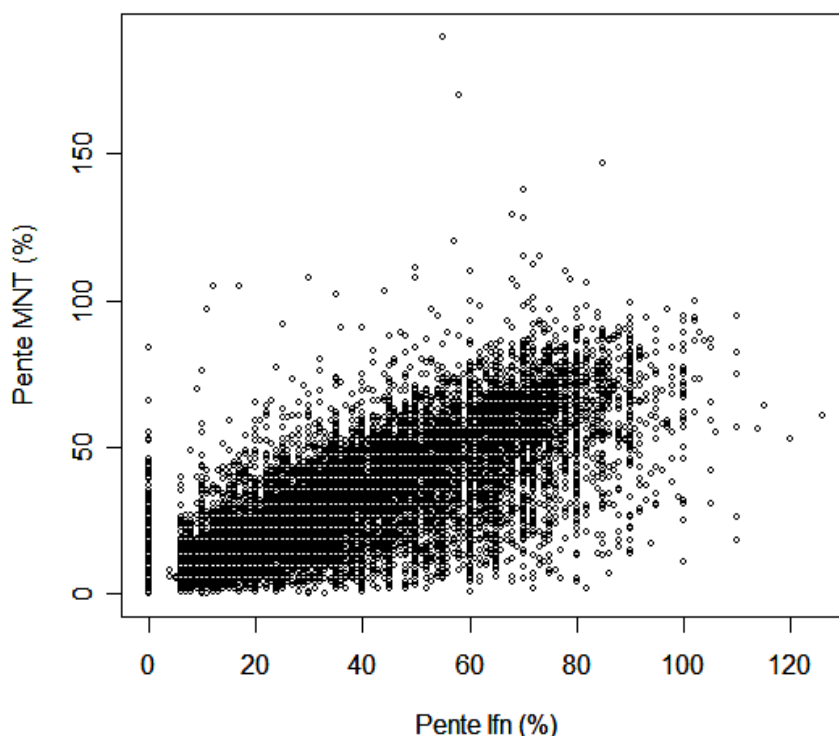
## 2.2 Comparaison des valeurs de pente lfn et MNT

Sur les placettes de l'fn, la pente est mesurée à l'aide d'un clisimètre, sur une distance d'environ 50 m, en suivant la ligne de plus grande pente traversant la surface décrite (placette circulaire de 25 m de rayon). Les pentes inférieures à 5 % sont considérées comme nulles et correspondent à un terrain plat.

Les valeurs de pente au point lfn ont été calculées à partir du MNT au pas de 50 m, d'une part, en utilisant la fonction « slope » de l'extension « Spatial Analyst » d'ArcMap®, et d'autre part, en utilisant les matrices d'altitude 3 x 3 pixels (8 plus proches voisins) et 5 méthodes standard de calcul des pentes : average variance ; frame finite difference, third-order finite differences method ; second-order finite differences method ; average maximum technique (ou neighborhood method) (cette dernière correspondant à la méthode « Spatial Analyst ») (Sharpnack & Akin, 1969 ; Horn, 1981 ; Dozier & Strahler, 1983 ; Zevenbergen & Thorne, 1987).

Ces cinq méthodes donnent, si on les compare entre elles, des résultats concordants. Les coefficients de corrélations minimum et maximum entre ces 5 méthodes sont respectivement égaux à 0,98 et 0,99. Appliquées aux 19 607 points de l'IFN, on observe des différences maximales dans les estimations des pentes de 1 pourcent pour 57,5% des points ; comprises entre 1 et 5 pourcent pour 38,9% des points ; comprises entre 5 et 10 pourcent pour 3,4% des points et supérieures à 10 pourcent pour 0,3% des points.

La comparaison de ces 5 méthodes aux données IFN conduit à des résultats similaires ( $R_{\text{mini}}=0,786$  et  $R_{\text{maxi}} = 0,792$ ), le « meilleur » résultat étant obtenu avec la méthode implémentée dans « Spatial Analyst ».



**Figure 2** : comparaison des valeurs de pente Ifn et calculées à partir du MNT sous Spatial Analyst (n= 19 607)

La comparaison de la pente mesurée sur le terrain et de celle obtenue sous "Spatial Analyst" montre des écarts assez importants (Figure 2). Ceci n'est pas étonnant car la pente MNT est calculée sur une distance plus grande que celle mesurée sur le terrain et ne tient pas compte de la topographie locale. La différence moyenne entre les deux valeurs est de 4,94 % (soit 2,8°). Les pentes mesurées sur le terrain sont supérieures à celles calculées à partir du MNT (Fig. 2).

27,3 % des points ont un écart de pentes supérieur à 10 % (soit 5,7°) et 7,85 % inférieur à -10%.

11,5 % des points ont un écart de pentes supérieur à 20 % (soit 11°) et 2 % inférieur à -20%.

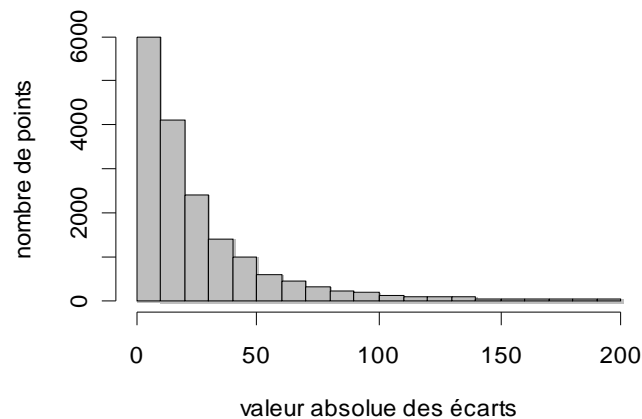
Il semble indispensable de continuer à mesurer la pente sur le terrain car pour certaines études il est important de tenir compte des conditions de milieu locales qui régissent fortement la présence ou l'absence des espèces végétales, ainsi que leur productivité.

### 2.3 Comparaison des valeurs d'exposition IFN et MNT

L'exposition est mesurée sur le terrain par l'Ifn avec une boussole dans la placette circulaire de 20 ares. Comme pour les valeurs de pente issues du MNT, les expositions ont été calculées avec l'extension « Spatial Analyst » d'ArcMap et à partir des résultats des calculs de pente selon les 5 méthodes utilisées dans le calcul de la pente (voir ci-dessus).

Comme pour les pentes, les cinq méthodes d'estimation conduisent à des résultats similaires lorsqu'on les compare entre elles ( $R_{\text{mini}}=0,896$  et  $R_{\text{maxi}} = 0,993$ ) ou lorsqu'on les confronte aux données IFN.

La moyenne des écarts en valeur absolue est de 27 grades. Un peu moins d'un tiers des points (31 %) ont des écarts inférieurs à 10 grades en valeur absolue (Fig. 3), 56 % des écarts sont inférieurs à 20 grades et 85 % inférieurs à 50 grades.



**Figure 3** : écart entre la valeur d'exposition mesurée sur le terrain et calculée à partir du MNT sous Spatial Analyst (n = 17405)

Si l'on classe les points dans 4 grands secteurs de 100 grades d'amplitude : Nord (centré sur 0 ou 400 grades, Est : centré sur 100 grades, Sud : centré sur 200 grades et Ouest : centré sur 300 grades), les trois quarts des points (75,7 %) sont dans le même secteur pour les deux méthodes. La correspondance entre les valeurs lfn et MNT est plus forte pour le secteur Est (79,9 %).

Les valeurs d'exposition mesurées sur le terrain ou issues du MNT ne sont pas très différentes et il pourrait être envisagé de ne plus les mesurer sur le terrain. Cependant ce n'est pas une mesure compliquée à réaliser, ni coûteuse en temps et il faut s'assurer qu'on ne perd pas en précision en substituant un calcul sous SIG à une mesure de terrain. Pour cela il faudrait par exemple comparer les deux valeurs dans les modèles de végétation pour voir si le passage de la mesure au calcul sous SIG n'affaiblit pas la force de prédiction de cette variable.

## **2.4 Comparaison de la topographie appréciée sur le terrain par l'Ifn et modélisée par le Lerfob (modèle POSITOP)**

Le Lerfob a développé une application sous SIG, appelée "POSITOPO", qui permet d'identifier les grandes positions topographiques sur l'ensemble de la France, à partir du MNT de l'IGN au pas de 50 m. Onze unités topographiques ont été définies et calculées par combinaison de différents indices visant à caractériser le ruissellement : 1- crête, 2- haut de versant, 3- milieu de versant, 4- bas de versant, 5- vallée, 6- plaine, 7- replat de versant, 8- rebord de plateau, 9- versant court, 10- dépression et 11- talweg.

La couverture raster issue de cette application a été croisée avec la couche des points lfn afin de récupérer pour chacun de ces points la position topographique associée. Celle-ci a été comparée avec la position topographique notée directement sur le terrain par les opérateurs de l'Ifn selon les modalités suivantes : 0- terrain plat (pente < 5 %), 1- sommet (vif, arrondi ou escarpement), 2- haut de versant, 3- mi-versant concave, 4- mi-versant rectiligne, 5- mi-versant convexe, 6- replat sur versant,



7- bas de versant, 8- vallée large, 9- dépression fermée, combes, fond de vallon étroit, situation de confinement.

Les résultats de cette comparaison sont présentés dans la table de contingence ci-dessous (pour 14 952 points).

**Tableau 1** : table de contingence des catégories de situations topographiques selon les classifications lfn (observation de terrain) et Lerfob (positopo).

TOPO	positopo											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	86	103	107	152	297	125	11	218	12	12	63
1	0	69	61	78	48	18	2	0	6	8	0	1
2	0	275	383	283	125	27	5	2	37	41	0	10
3	0	103	418	618	327	32	5	0	18	42	0	31
4	1	609	2323	3037	1120	86	17	4	72	140	2	116
5	0	111	414	603	287	36	3	0	14	51	0	37
6	0	43	41	49	75	10	1	1	8	6	0	3
7	0	11	69	149	234	19	2	0	7	24	0	90
8	0	1	17	25	81	47	14	0	4	7	5	49
9	0	20	99	153	147	15	3	0	8	20	2	51

Les deux classifications ne sont pas directement comparables. Aussi nous avons analysé les résultats par grande famille de position topographique.

Les points notés en terrain plat (0) par l'lfm sont classés majoritairement en vallée (5) et rebord de plateau (8) par le modèle positopo. L'lfm a un code particulier pour les vallées larges (8) qui dans le modèle positopo sont associées en partie aux vallées (5) mais aussi et surtout aux bas de versant (4) et dans une moindre mesure aux talweg (11).

Les catégories terrain plat et vallée large de l'lfm ne sont pas exclusives et l'une ou l'autre peut être utilisée pour décrire une même situation. Les limites de ces catégories et des catégories correspondantes dans positopo mériteraient d'être précisées.

On peut penser que la catégorie sommet (1) de l'lfm doit correspondre aux catégories crête (1) ou haut de versant (2) de positopo. Or on trouve plus de points en situation de milieu de versant (3) qu'en situation de crête (1).

Les catégories lfm mi-versant concave (3), mi-versant rectiligne (4) et mi-versant convexe (5) se retrouvent majoritairement classés par positopo en milieu de versant mais aussi en haut et bas de versant.

Les points situés en replat sur versant (6) d'après l'lfm ne se retrouvent pas dans la catégorie replat de versant (7) de positopo mais sont répartis le long du versant jusqu'à la crête. Positopo privilégie probablement la position dans le versant alors que les agents de l'lfm doivent privilégier le caractère plat du terrain. Il est effectivement difficile de se situer de façon globale sur un versant lorsque l'on n'en a pas une vue d'ensemble, ce qui est le cas sur le terrain.

Les différences de classement quant à la position sur le versant sont principalement dues à la différence d'échelle d'appréciation entre les deux méthodes.

Les situations confinées décrites par l'lfm (code 9 : dépression fermée, combes, fond de vallon étroit, situation de confinement) n'ont pas leur équivalent dans positopo et sont classées en bas de versant, milieu de versant et haut de versant pour leur majorité.

A la lumière de cette comparaison, la topographie locale, à l'échelle de la placette lfn de 20 ares, n'est pas bien appréciée par le modèle positopo. L'intérêt du modèle positopo réside par contre dans le fait qu'il permet de mieux se situer dans le paysage environnant, à plus petite échelle, comme le long d'un versant par exemple ou dans une vallée. Ces situations sont difficilement appréciables depuis une placette lfn. Le modèle positopo et les observations lfn pourraient être utilisées de façon complémentaire, le premier caractérisant mieux la situation dans le paysage général et le deuxième permettant de prendre en compte les caractéristiques topographiques locales, à grande échelle. Cependant cette comparaison mérite d'être affinée en se penchant sur les définitions de chacune des deux classifications et en essayant de créer une classification complémentaire, voire emboîtée.

## **2.5 Conclusion**

Les valeurs d'altitude et d'exposition extraites du MNT sont suffisamment proches des valeurs relevées sur le terrain pour pouvoir les remplacer, avec néanmoins une réserve pour l'exposition. Par contre, la pente doit continuer à être mesurée directement sur le terrain pour mieux rendre compte des conditions locales qui sont celles qui agissent sur les espèces végétales. Il en est de même de la position topographique qui pourrait cependant être améliorée dans certaines situations difficiles à décrire directement depuis la placette d'inventaire en complétant l'observation de terrain par les informations données par le modèle positopo basé sur le MNT au pas de 50 m.

## **3 Estimation du rayonnement solaire global**

(travail correspondant au point 5.2.2 de la convention)

Trois méthodes différentes ont été mises en œuvre pour calculer le rayonnement solaire. Tout d'abord, l'IFN a utilisé un module de calcul de rayonnement solaire existant avec le logiciel Arcview. Dans un deuxième temps, et considérant qu'aucun logiciel sur le marché ne permettait de réaliser des calculs fins sur de larges emprises, l'ENGREF a développé son propre programme, qui a été appelé Helios. Enfin, l'INRA a eu une approche satellitale et utilisé les données METEO FRANCE SATMOS. Le logiciel Solar analyst a permis le calcul de rayonnement pour chacun des points de relevés de l'IFN tandis que les méthodes Helios et SATMOS ont abouti au calcul d'une matrice de valeurs couvrant la France, au pas de 50 m pour Helios et 3 km pour SATMOS. Ces trois approches ont ensuite été comparées.

### **3.1 Calcul du rayonnement avec le modèle Solar Analyst**

(réalisé par l'IFN)

#### **3.1.1 Présentation de Solar analyst**

Solar Analyst est une extension du logiciel ArcView 3.x d'ESRI. Il fait partie de la famille des modèles spatiaux qui ont été développés pour estimer le rayonnement solaire sur des surfaces ou un ensemble de points, contrairement aux modèles ponctuels qui fournissent un résultat au niveau d'un seul site à la fois. Ces derniers sont plus précis pour calculer la radiation sur un site donné mais ne permettent pas de modéliser la radiation sur des surfaces. Solar analyst est donc intéressant dans notre cas puisque nous voulons calculer le rayonnement solaire reçu en une année sur l'ensemble du territoire en tenant compte de la variabilité spatiale due à la latitude et au relief.

Le calcul du rayonnement solaire nécessite de connaître la partie de ciel visible et l'orientation du point ou du pixel concerné. La portion de ciel visible se déduit de la topographie locale qui détermine

les zones d'ombrage. Dans les modèles spatiaux ces informations sont issues de l'analyse d'un MNT. Pour notre étude, nous avons utilisé le modèle numérique de terrain à pas de 50 m de l'IGN.

Solar analyst prend en compte dans son calcul de radiation l'altitude, l'orientation (pente et exposition), l'ombrage du au relief environnant, les changements de position du soleil selon l'heure de la journée ou la saison dans l'année, l'influence de l'atmosphère (effet filtre) pour chaque pixel du MNT. La latitude est par contre mal gérée par ce modèle car une seule valeur de latitude peut-être saisie pour toute la zone concernée par le calcul. Pour pallier ce problème nous avons découpé la France en plusieurs tranches de latitude.

Les principales composantes de la radiation solaire (directe, diffuse et globale) peuvent être calculées avec Solar Analyst. Il est possible de calculer le rayonnement reçu pour une période de temps variable allant de la journée à l'année entière avec le détail des valeurs mensuelles. Le calcul peut être réalisé sur l'ensemble du MNT ou sur une partie seulement, définie par un masque ou par une liste de points identifiés par leurs coordonnées. Les résultats sont sous forme de carte (grid) ou de fichiers texte lorsqu'il s'agit d'un calcul sur un ensemble de points.

Les variations des conditions atmosphériques jouent sur la transmissivité de l'atmosphère et la proportion de radiation diffuse. Solar analyst ne prend pas en compte la nébulosité. Ce modèle n'est pas adapté pour l'étude des variations temporelles de la radiation. Il est mieux adapté à l'étude des variations spatiales.

### **3.1.2 Paramétrage de Solar Analyst**

#### ***Latitude***

Solar Analyst calcule la radiation pour une latitude donnée, ce qui est un inconvénient pour un calcul à grande échelle. Pour surmonter cet inconvénient, nous avons divisé, la France en tranches d'altitude de 1 ; seuil qui semble correspondre à la limite de sensibilité de Solar Analyst. Le calcul des radiations directe, diffuse et globale a été réalisé à pas mensuel. La valeur de la radiation globale annuelle correspond à la somme des radiations globales mensuelles. La valeur de la radiation globale pendant la période de végétation correspond à la somme des radiations globales pour la période avril-octobre.

#### ***Calcul par points IFN ou par cellule du MNT***

Les calculs de radiation sur l'ensemble du territoire sont très consommateurs de temps. Comme nous avons besoin de connaître la radiation au niveau de chaque placette de l'IFN et non pas sur toute la surface du territoire, nous avons comparé les valeurs obtenues par le calcul par points, beaucoup plus rapide, à celles du calcul sur l'ensemble du MNT. Pour les 98 148 points correspondant à un cycle d'inventaire IFN le calcul de la radiation pour les 12 mois de l'année dure un peu moins de deux heures. Dans le cas du calcul par point, le logiciel calcule la radiation reçue au niveau du point (en l'occurrence les placettes de l'IFN), tandis que dans le calcul basé sur les cellules du MNT, la valeur de radiation obtenue est celle du centre de la cellule du MNT dans lequel se trouve le point IFN. Nous avons donc étudié la différence entre les valeurs obtenues par les deux modes de calcul.

La comparaison des valeurs de radiation selon le mode de calcul a été restreinte à la région Rhône-Alpes afin de diminuer les temps de calcul. Cette région a été choisie car elle offre une grande diversité topographique et correspond à une des deux régions pilote du programme national de relance de la typologie des stations forestières.

La région Rhône-Alpes comptait lors du dernier cycle d'inventaire 10 180 points (inventoriés entre 1993 et 2000). Les différences entre les deux valeurs sont comprises entre -5 % et +5 % pour 90 % des points. Les écarts importants sont observés principalement en altitude, où les valeurs de la radiation calculées par le mode surfacique sont plus fortes que celles calculées au niveau des points, ainsi que sur les versants nord et ses dérivées, et sur les fortes pentes.

### ***Transmissivité, nombre de secteurs de ciel***

Le coefficient de transmissivité de l'atmosphère ainsi que le nombre de directions angulaires par rapport au Nord (azimut) et par rapport à la verticale (zénith) font partie des paramètres d'entrée du modèle. Nous avons fait varier ces paramètres afin de tester le comportement du modèle et de choisir des valeurs optimales. Ces tests ont été réalisés sur la région Rhône-Alpes avec le mode de calcul par points.

On n'observe pas de différences significatives des résultats lorsque le nombre de directions angulaires par rapport au Nord et par rapport à la verticale passe de 8 à 16. Par contre, lorsque le nombre de directions est de 32, les valeurs de radiation diminuent de façon importante. Le nombre de divisions angulaires par rapport au Nord (azimut) a une forte influence sur le temps de calcul de Solar Analyst. Plus il augmente plus le calcul sera long. Cependant, dans les régions montagneuses, le calcul de la radiation sera plus précis si on augmente le nombre de secteurs angulaires car les effets d'ombrage du relief environnant seront mieux pris en compte. Le nombre de secteurs de ciel a une influence sur le calcul de la radiation diffuse mais celle-ci ne représente qu'une faible partie de la radiation globale.

Le coefficient de transmissivité utilisé par défaut dans le calcul de la radiation directe est de 0,5. En fixant le coefficient de transmissivité à 0,6 pour un nombre défini de divisions du ciel, on obtient des valeurs de rayonnement global systématiquement plus élevées que les valeurs mesurées par Météo France.

Nous avons choisi de fixer le coefficient de transmissivité à 0,5 car les valeurs de radiation ainsi calculées étaient plus proches de celles mesurées par Météo France. Le nombre de directions angulaires par rapport au Nord et par rapport à la verticale a été fixé à 8.

## **3.2 Elaboration d'un modèle de rayonnement multi-échelles : Helios**

(réalisé par l'ENGREF)

Le rayonnement solaire est une donnée fondamentale en écologie, intervenant dans la distribution, la composition, et la productivité des écosystèmes (photosynthèse, cycle de l'eau). Il n'est pas étonnant que de nombreux auteurs aient cherché à relier la distribution des écosystèmes ou des communautés au rayonnement global (Brown, 1994; Dirnbock et al., 2003; Guisan et al., 1998; Lehmann et al., 2002; Tappeiner et al., 1998; Zimmermann and Kienast, 1999). En parallèle, de nombreux calculs ont essayé de caractériser le rayonnement solaire, parfois de façon indirecte (sinus ou cosinus de l'exposition) (Austin et al., 1990; Guisan et al., 1998; Pierce et al., 2005) ou encore à l'aide de modèles de rayonnement solaires développés sous SIG (Hetrick et al., 1993; Kumar et al., 1997; Wilson and Gallant, 2000). Cependant, aucun de ces moyens ne permet d'obtenir une information utilisable à fine résolution sur de larges emprises. L'interpolation de données à partir de postes mesurés donne des résultats approximatifs faute d'une densité de points suffisante, le rayonnement solaire étant une donnée la plus rarement mesurée dans les postes météorologiques. L'utilisation de données satellitales ne permet pas de prendre en compte la topographie locale, et les modèles SIG existant ne sont, pour la plupart, valables que sur de petites surfaces du fait de la non prise en compte des variations de latitude ou de nébulosité.

Ainsi, peu d'études utilisant le rayonnement solaire ont été jusqu'à présent réalisées sur une aussi vaste emprise que le territoire français. Pourtant, le développement de bases de données phytoécologiques ou dendrométriques à l'échelle nationale nécessite des données précises afin de pouvoir étudier l'écologie des espèces et permettre leur modélisation. C'est le cas des bases de l'IFN et de l'ENGREF qui ont toutes deux pour caractéristiques de couvrir l'ensemble du territoire français. La réalisation de modèles de distribution ou de fertilité des essences nécessite de travailler sur de vastes emprises afin d'obtenir un gradient de conditions écologiques le plus large possible. Cela ne doit pas se faire au détriment de la qualité des données, le modèle se trouvant bien évidemment altéré si les données sont peu précises localement. Les variables écologiques doivent donc être disponibles sur de larges espaces avec un maximum de précision. Cela est particulièrement vrai pour le rayonnement solaire qui combine à la fois une variabilité locale due aux changements de topographie, et une variabilité à large échelle conditionnée par les variations de latitudes et les changements de nébulosité. L'absence de prise en compte de la variabilité globale aurait pour conséquence un rayonnement solaire égal à conditions topographiques identiques, et l'absence de prise en compte de la topographie aurait pour conséquence un rayonnement solaire équivalent sur les versants nord et sud des montagnes.

Afin de combler cette lacune, l'ENGREF a réalisé un travail en plusieurs étapes :

- synthèse bibliographique des modèles existants ;
- choix des algorithmes jugés les plus pertinents, en cherchant un bon compromis entre simplicité de calcul et prise en compte des principaux paramètres déterminant le rayonnement et élaboration de la méthode de calcul ;
- réalisation d'un programme prenant en compte les variations topographiques (pente, altitude, exposition, effets de masque) et les variations à large échelle (nébulosité, latitude). La prise en compte de la nébulosité a nécessité l'interpolation de données sur le territoire national à partir de données issues du réseau Météo France. La prise en compte du gradient latitudinal a nécessité d'utiliser la latitude comme variable dans les calculs. Le programme réalisé à l'ENGREF a été appelé Hélios ;
- application du programme Helios au calcul mensuel des rayonnements solaires à l'échelle nationale à une résolution de 50 mètres de côté. La plupart du temps, des modèles de rayonnement sont appliqués à l'échelle locale voire régionale (Dirnböck and Dullinger, 2004; Engler et al., 2004; Guisan and Theurillat, 2000; Miller and Franklin, 2002; Ohmann and Gregory, 2002). Le calcul du rayonnement global sur la France entière (540000 km<sup>2</sup>) dépasse largement les surfaces considérées dans la plupart des études publiées (quelques dizaines voire centaines de km<sup>2</sup>). Le calcul réalisé a nécessité l'élaboration de 12 couches de données comprenant chacune 220 000 000 de pixels, mobilisant les ressources d'une machine pendant plus d'un mois à temps plein (40 Go de données).

Le calcul du rayonnement solaire a donné lieu à la rédaction d'un article scientifique figurant en Annexe 1, qui est actuellement sous presse et sera prochainement publié dans la revue « *Annals of forest science* ». (Piedallu and Gégout, 2007). Le programme a été utilisé depuis pour faire des calculs dans une dizaine de pays d'Europe dans le cadre d'une étude sur l'impact du réchauffement climatique dans les montagnes d'Europe (workshops Euromont, coordination Antoine Guisan, Université de Lausanne, Suisse), et au Chili dans le cadre d'un projet Franco-Chilien (coordination Paulina Pinto, Universita catolica de santiago, Chili). D'autres demandes d'utilisation sont actuellement en cours, notamment dans le cadre du programme SylvoEcoRégions (SER) piloté par l'IFN.

Le programme Helios a été développé en langage aml pour être compatible avec le logiciel SIG ArcInfo, qui est un des logiciels SIG les plus utilisés au monde. Ce programme permet de calculer le rayonnement à la résolution du modèle numérique de terrain, quelle que soit l'échelle de travail. Les

intrants se composent uniquement du Modèle Numérique de Terrain et de valeurs de nébulosité, ces données étant disponibles gratuitement sur le web pour la plupart des pays. Les valeurs de nébulosité, qui sont relevées sur la plupart des postes météo, peuvent également être interpolées à partir des mesures de terrain. Les calculs ont été réalisés sur la France entière à la plus petite résolution couvrant le territoire entier (50 \* 50 m). Dans un deuxième temps nous avons évalué la sensibilité du modèle à différentes échelles géographiques en fonction de la pente, de l'exposition, de l'altitude ou de la nébulosité.

### **3.2.1 Méthode de calcul du rayonnement solaire**

#### **3.2.1.1 Description du modèle**

Les radiations à faible longueur d'onde (0.28-5  $\mu\text{m}$ ) peuvent être séparées en 3 composants : le rayonnement direct, le plus important, le rayonnement diffusé par l'atmosphère et qui dépend de sa composition, et le rayonnement réfléchi par le sol (Gates, 1980). Le rayonnement global, somme de ces trois composantes, est déterminé par trois groupes de facteurs : les relations géométriques entre le soleil et la surface de la terre, l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère, et les facteurs topographiques (Hofierka and Suri, 2002). Des formules astronomiques permettent de calculer les relations géométriques entre le soleil et la terre en fonction de la localisation et du moment. Le facteur d'atténuation atmosphérique est conditionné par la présence de gaz, et de particules solides ou liquides, qui sont fonction de l'épaisseur de l'atmosphère et donc de l'altitude. Les facteurs topographiques induisent de fortes variations à l'échelle locale du fait des variations de pente et d'exposition, qui modifient l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Les effets de masque de versant opposés peuvent également jouer un rôle important. Ils peuvent être simulés à l'aide d'un modèle numérique de Terrain, avec une grande précision qui sera cependant fonction de la qualité du MNT utilisé. Nous avons choisi de prendre en considération l'atténuation par les nuages de façon séparée, permettant le calcul du rayonnement sous ciel clair ou sous ciel nuageux, et éventuellement d'intégrer différentes sources de couverture nuageuse. Pour cela nous utilisons des équations empiriques basées sur des mesures de terrain réalisées en Allemagne et fournies par Kasten et Czeplak (Kasten and Czeplak, 1980)

##### **3.2.1.1.1 Géométrie entre le soleil et la terre**

La position du soleil dans le ciel est fonction de l'heure et de la latitude. Au début du calcul une grille avec des valeurs de latitude est générée pour chaque pixel, permettant par la suite l'utilisation de la latitude comme variable.

La position du soleil est définie par deux angles caractérisant l'altitude et l'azimuth solaire :

$$\sin \alpha = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \eta * \cos \delta$$

avec  $\varphi$  la latitude pour chaque cellule,  $\eta$  étant l'heure solaire,  $\delta$  la déclinaison solaire, qui varie en fonction du jour julien J :

$$\delta = 23.45 * \sin(360 (284 + J) / 365)$$

l'azimuth solaire ( $\beta$ ) est l'angle entre le soleil et le nord. Nous avons utilisé la formule d'Oke (Oke, 1987) :

$$\cos \beta = (\sin \delta * \cos \varphi - \cos \delta * \sin \varphi * \cos \eta) / \cos \alpha$$

### 3.2.1.1.2 Caractéristiques du flux solaire

Nous avons calculé le flux solaire à la sortie de l'atmosphère ( $R_{out}$ ,  $W/m^2$ ) avec le modèle de Kreith and Kreider (1978). Le flux solaire est fonction de la constante solaire  $Sc$  (valeur utilisée fournie par le World Radiation Center,  $1367 W/m^2$ ), et le jour de l'année ( $J$ ) :

$$R_{out} = Sc * (1 + 0.034 * \cos (360 J/365))$$

Le coefficient de transmissivité  $\tau^M$  représente la fraction du rayonnement incident à la surface de l'atmosphère qui atteint le sol le long d'une trajectoire verticale. Nous avons choisi une valeur de 0.6 pour  $\tau$  (Gates, 1980).  $M$  représente la longueur du trajet en fonction de l'azimut solaire. En zone de montagne, il est nécessaire d'utiliser un facteur de correction lié à la pression atmosphérique  $p/p_0$ , qui dépend de l'altitude. Nous avons utilisé les formules de List (1984) et Kreith and Kreider (1978) :

$$M = M_0 * P/P_0$$

$P/P_0$  (mbar/mbar) étant le facteur de correction de la pression atmosphérique :

$$P/P_0 = ((288 - 0.0065 * h)/288)^{5.256}$$

$h$  étant l'altitude et  $M_0$  étant calculé grâce à la formule suivante :

$$M_0 = \sqrt{1229 + (614 * \sin \alpha)^2} - 614 * \sin \alpha$$

### 3.2.1.1.3 Effets liés à la topographie

Pour calculer le rayonnement sur des zones pentues, il est nécessaire de prendre en compte l'angle d'incidence entre le rayon solaire et la surface du sol ( $\cos i$ ). Il varie en fonction de la position du soleil et de la topographie (Campbell, 1981) :

$$\cos i = \cos \alpha * \sin \chi * \cos (\beta - \beta_s) + \sin \alpha * \cos \chi$$

$\chi$  étant la pente (degrés), et  $\beta_s$  l'exposition (degrés).

### 3.2.1.1.4 Calcul du rayonnement global

Le calcul horaire du rayonnement global est obtenu par la somme des composantes directes ( $R_{dir}$ ), diffuses ( $R_{diff}$ ) et réfléchies ( $R_{ref}$ ) :

$$R_{dir} = Sh * R_{out} * \tau^M * \cos i$$

$Sh$  étant une valeur binaire d'ombrage calculée pour chaque heure de la journée et chaque valeur entière d'angle solaire ( $\alpha$ ) et d'azimut solaire ( $\beta$ ) (table I).  $Sh$  est calculé en utilisant la commande "Hillshade" du logiciel Arcinfo, qui permet de simuler la projection d'un rayon lumineux de la position estimée du soleil vers le MNT. Quand la cellule est à l'ombre des montagnes voisines la valeur 0 est affectée, sinon c'est la valeur 1.

Nous avons utilisé le modèle isotropique de Liu and Jordan (1960) pour calculer le rayonnement réfléchi. Ce modèle prend en compte l'angle solaire et la transmissivité de l'atmosphère dans des conditions de ciel clair :

$$R_{diff} = R_{out} * (0.271 - 0.294 * \tau^M) * \sin \alpha \quad (10)$$

Le rayonnement réfléchi est calculé à partir de la formule de Gate (Gates, 1980) :

$$R_{ref} = r * Sc * (0.271 + 0.706 \tau^M) * \sin \alpha * \sin^2 (\chi/2)$$

r étant la réflectance du sol (nous avons utilisé une valeur constante de 0.2).

La somme des trois composantes permet d'estimer le rayonnement global (Rtot) pour chaque heure de calcul (W/m<sup>2</sup>) :

$$R_{tot} = R_{dir} + R_{diff} + R_{ref}$$

Les valeurs journalières de rayonnement global sont obtenues en faisant la somme des valeurs horaires entre le lever et le coucher du soleil.

Les conditions nuageuses (Dubayah, 1997; Hofierka, 2002) sont calculées en utilisant le "cloud attenuation factor" (Kc) défini par Kasten and Czeplak (1980). Cette équation ne nécessite que des valeurs mesurées en octas comme on les trouve généralement dans les postes météo, un octa représentant 1/8 du ciel visible. Nous avons interpolé 30 ans de mesures sur 87 stations de Météo France utilisant la méthode IDW. Le rayonnement solaire avec ciel nuageux (Rtotc) est ensuite calculé :

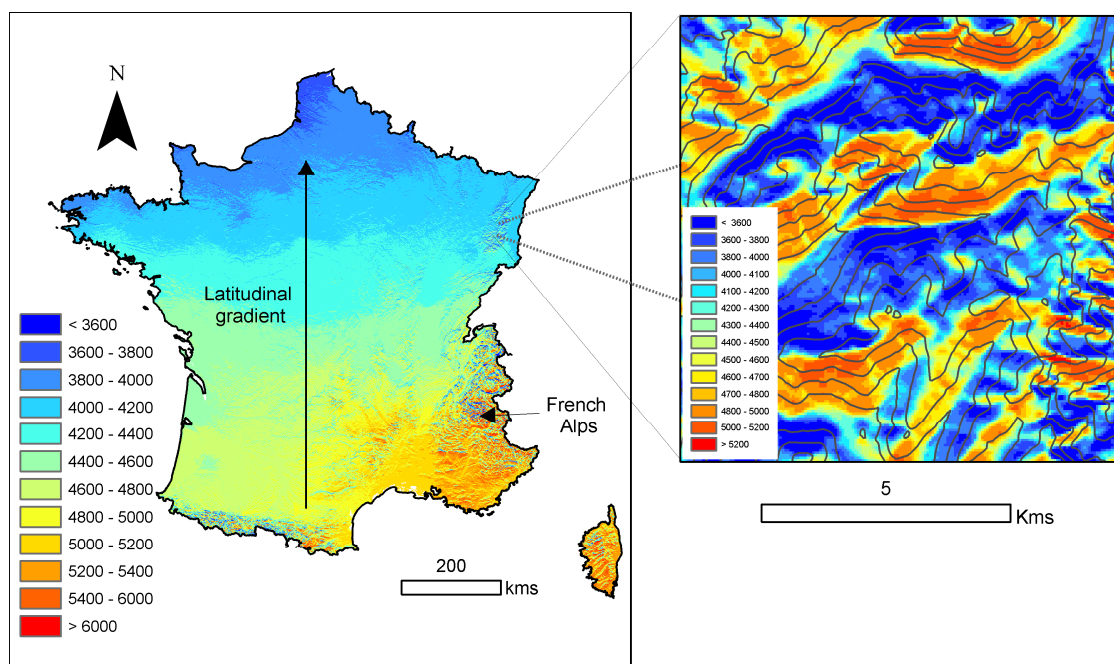
$$R_{totc} = R_{tot} * Kc$$

avec  $Kc = (1 - 0.75(N/8)^{3.4})$   
N étant la nébulosité en octas

Le rayonnement global peut être calculé pour des durées allant d'un jour à un an, par sommation des valeurs journalières pendant la période considérée. Afin d'économiser du temps de calcul, il est possible de calculer une valeur mensuelle en extrapolant un nombre limité de jours de calcul.

L'utilisation du SIG permet d'obtenir en sortie une matrice de pixels de 50 mètres de coté, couvrant toute la France ; chaque pixel contenant une valeur de rayonnement pour chaque mois de l'année. Le format numérique de ces données et leur fine résolution permet au forestier de terrain, ou qu'il se trouve en France, de pouvoir appréhender la variabilité spatiale du rayonnement solaire à l'échelle de la forêt (**Figure 4**). Cette donnée est évidemment beaucoup plus intéressante pour le gestionnaire que la mesure du poste le plus proche, souvent relativement éloignée.





**Figure 4.** Rayonnement solaire global annuel sur la France entière. Le zoom sur le bassin versant de Cornimont (Vosges) montre la variabilité spatiale du calcul à petite échelle (valeurs en MJ/m<sup>2</sup>).

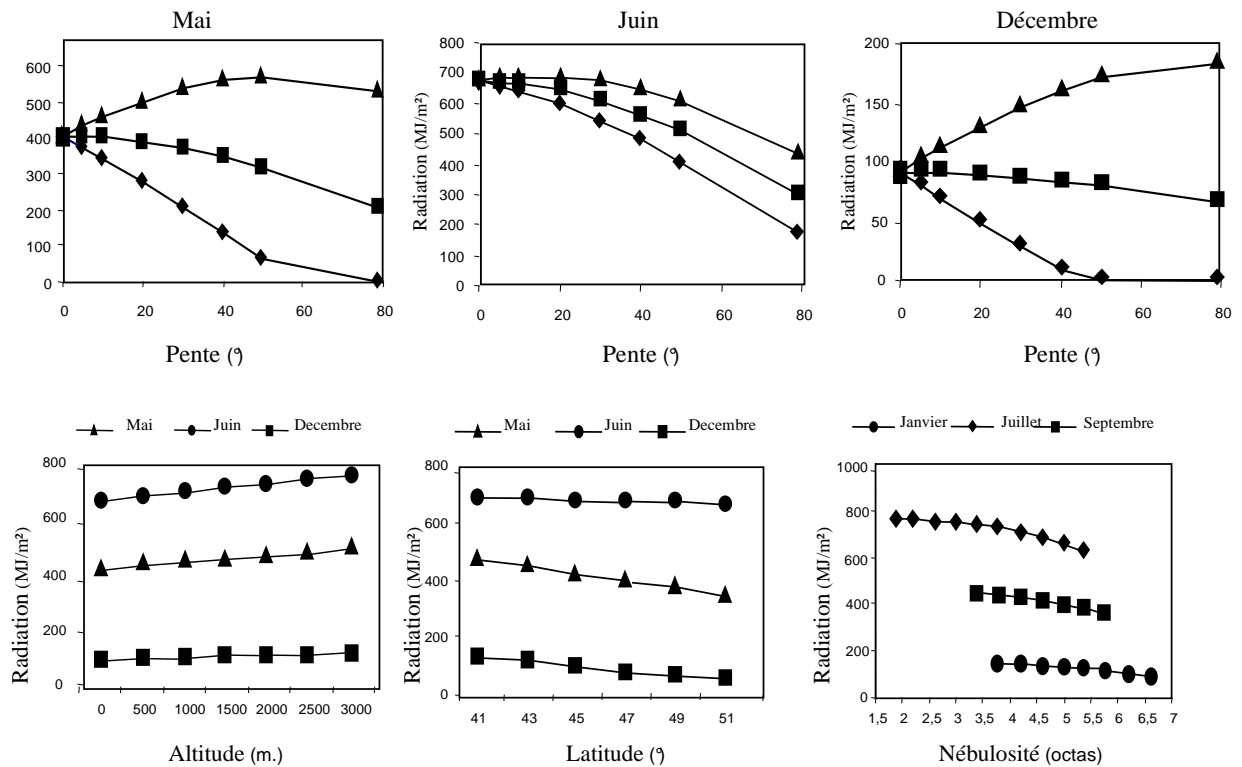
Nous obtenons des valeurs annuelles variant entre 1200 et 7200 MJ/m<sup>2</sup> pour la France, pour une valeur moyenne approchant 4500 MJ/m<sup>2</sup>. Le gradient latitudinal est visible, tout comme la forte variabilité due à la topographie, que l'on peut observer sur la **Figure 4** dans le bassin versant de Cornimont (Massif Vosgien). On observe que l'écart de rayonnement entre deux versants pentus dans les Alpes est relativement identique à l'écart de rayonnement sur terrain plat entre le nord et le sud de la France. La différence de rayonnement entre le bassin méditerranéen et la cote landaise, à latitude égale, ressort assez nettement.

### 3.2.2 Sensibilité du modèle Helios

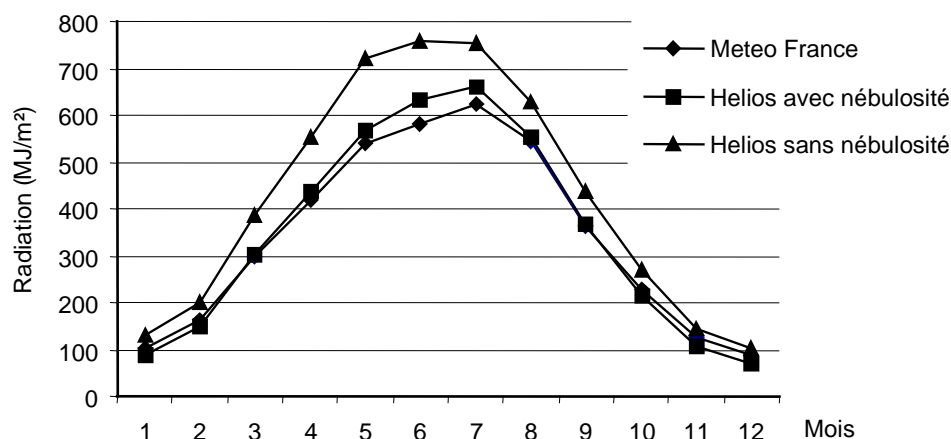
Nous avons étudié la sensibilité du modèle selon différentes conditions de pente, d'altitude, d'exposition, et de nébulosité. Pour cela nous avons travaillé à trois différentes échelles emboîtées : la France entière (540000 km<sup>2</sup>), la région Lorraine (24000 km<sup>2</sup>), et le bassin versant de Cornimont situé dans les montagnes Vosgiennes, entre Epinal et Colmar (2.4 km<sup>2</sup>). Pour chacun de ces sites, nous avons calculé la variabilité du rayonnement solaire en prenant les valeurs moyennes pour chacune des variables testées (pente, exposition, altitude, latitude, nébulosité), sauf pour celles dont on veut tester le comportement dont on a fait varier les valeurs entre les valeurs extrêmes présentes sur le site, selon un intervalle défini. Par exemple, pour étudier l'effet de la latitude à l'échelle de la France, nous avons pris les valeurs moyennes de pente, d'exposition, d'altitude et de nébulosité calculées sur la France, et fait varier la latitude entre 41° et 51°, par étapes de 1°. Ces valeurs correspondent au x latitudes minimales et maximales rencontrées en France. Pour l'altitude, le test a limité à 3000 m, qui représente la limite supérieure de végétation.

L'analyse approfondie de la sensibilité du modèle montre qu'une augmentation de latitude ou de la nébulosité entraîne une diminution du rayonnement global, tandis qu'une augmentation d'altitude et une pente croissante orientée au sud induisent une augmentation des radiations (**Figure 5**). La prise en compte de la nébulosité est particulièrement importante. Ainsi, la corrélation entre les postes Météo-France et le modèle passe de 0,78 à 0,46 pour l'année (de 0.62 à 0.02 pour le mois de juin) si

on exclut la couverture nuageuse (**Figure 6**). Cependant, les valeurs de rayonnement ne sont pas dépendantes des mêmes paramètres selon la taille de la zone étudiée (**Tableau 2**). A l'échelle locale, la pente, l'exposition et, dans une moindre mesure, l'altitude, jouent un rôle essentiel. A l'échelle nationale, la latitude et la nébulosité deviennent prépondérantes, confirmant ainsi l'importance d'un modèle prenant en compte la totalité de ces paramètres. On peut estimer qu'au-delà d'un secteur d'étude ayant la taille d'une région, l'utilisation d'un modèle radiatif qui ne prend pas en considération les variations de latitude et de nébulosité entraîne d'importantes erreurs.



**Figure 5.** Variations de rayonnement solaire en fonction de l'altitude, de la latitude, et de la nébulosité (MJ/m<sup>2</sup>)



**Figure 6.** Rayonnement calculé par Helios avec et sans nébulosité pour le poste météo de Luxeuil (moyenne 1961-1990).

	France (540 000 km <sup>2</sup> )			Lorraine (24 000 km <sup>2</sup> )			Cornimont (2,4 km <sup>2</sup> )		
	mai	juin	déc.	mai	juin	déc.	mai	juin	déc.
Alt. limitée à 3000 m	77	90	25	23	37	7	21	34	8
Nébulosité	106	152	45	5	8	5	0	0	0
Latitude	209	46	115	9	7	1	0	0	0
Expo. avec pente 5°	59	24	22	35	24	14	48	29	18
Expo. avec pente 10°	114	46	41	37	50	29	95	58	37
Expo. avec pente 20°	224	91	81	172	98	57	187	115	72
Expo. avec pente 40°	944	170	153	323	185	106	N	N	N

**Tableau 2.** Amplitude des radiations du modèle Hélios (MJ/m<sup>2</sup>) obtenues en faisant varier les valeurs des paramètres entre leurs deux extrêmes sur trois sites d'étude de taille décroissante. L'altitude maximale est celle de la limite de végétation (estimée à 3000 m) et la pente maximale testée est de 40°. N = non observé.

### **3.3 Intégration des données satellitales de rayonnement : SATMOS**

(réalisé par l'INRA)

#### **3.3.1 Généralités**

Le Service d'Archivage et de Traitement Météorologique des Observations Spatiales (SATMOS) est un service issu d'une coopération entre Météo-France et le CNRS. Sa vocation est d'archiver et de diffuser auprès de l'ensemble de la communauté scientifique les données des satellites météorologiques (satellites défilants ou géostationnaires).

En complément des images « brutes », le SATMOS diffuse des données géophysiques dérivées des images satellites. Parmi ces données, le SATMOS propose des cartes d'éclairement solaire incident à la surface calculées à partir des données du canal visible Météosat suivant une méthode dérivée de Gautier *et al.* (1980). Ce calcul utilise un coefficient d'étalonnage Météosat, déterminé à partir d'une comparaison d'une série de données satellitaires et de mesures de surface faites en 1987.

La sensibilité du radiomètre visible est évaluée en permanence en suivant les variations interannuelles des comptes relevés sur des cibles désertiques homogènes (Marsouin *et al.* 1989 ; Brisson *et al.* 1990). Les résultats sont comparés mensuellement à des mesures pyranométriques du réseau de Météo-France (42 postes).

#### **3.3.2 Traitement des images**

Le laboratoire de Phytoécologie Forestière de l'INRA a fait l'acquisition des données de rayonnement depuis 1991, cependant la résolution des images s'est très nettement améliorée à partir de 1996 : la surface moyenne des pixels sur la France est passée de 1 100 à 10 km<sup>2</sup>. En conséquence, nous n'utilisons ici que les données mesurées sur la période 1996 - 2002.

Les données sont acquises sous forme d'images brutes (norme IEEE) représentant des synthèses décennales sur une surface de 469 pixels colonnes x 322 pixels lignes (de 6° ouest à 10° est et de 41° à 52° nord). Les images sont transformées en « fichiers texte » de façon à calculer des cumuls mensuels de rayonnement puis des moyennes mensuelles sur la période 1996-2002. Les coordonnées des pixels sont enfin converties dans le système Lambert 2 étendu afin d'obtenir une grille de polygones sur lesquels peuvent être projetés les points IFN.

## **4 Les indices bioclimatiques**

### **4.1 Calculs et spatialisation des indices climatiques** (réalisé par l' ENGREF)

Plusieurs indices bioclimatiques permettant de caractériser la sécheresse ont été calculés sous SIG, par combinaison de données issues du modèle AURELHY (Benichou and Le Breton, 1987), du MNT BD alti de l'IGN, et des radiations solaires précédemment calculées. Il s'agit de l'indice annuel de De Martonne, du quotient pluviométrique d'Emberger, de l'angle de continentalité de Gams modifié par Michalet, et des ETP Turc, Hargreaves et Thornthwaite. Le calcul de ces indices est détaillé dans une publication fournie en annexe 2 (Lebourgeois et Piedallu, 2005) intitulée « appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques ».

Le calcul de ces données permet d'enrichir le panel d'indices numériques disponibles pour le gestionnaire, et de cartographier ces indices avec une résolution variant de 50 mètres de coté pour ceux qui sont calculés à partir du MNT, à 1 km de coté pour ceux calculés à partir des données climatiques du modèle AURELHY .

MNT, à 1 km de coté pour ceux calculés à partir des données climatiques du modèle AURELHY .

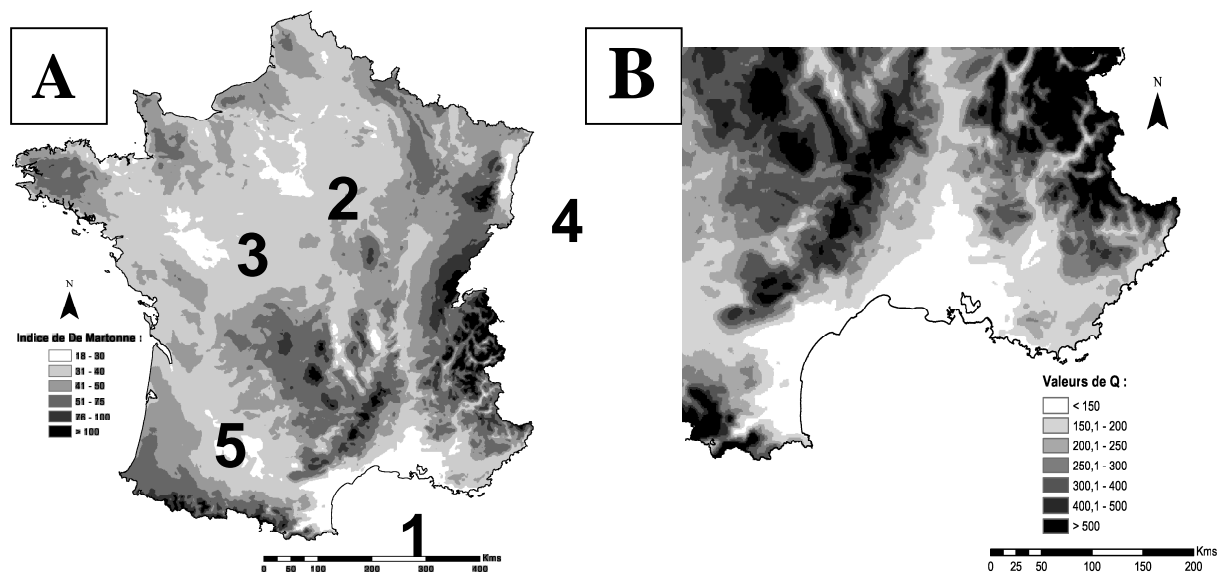
#### **4.1.1 Indice d'aridité de De Martonne**

En se basant sur des considérations essentiellement géographiques, De Martonne (1926) a défini l'aridité du climat à l'échelle annuelle par le quotient :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a proposé six grands types de macroclimats allant des zones désertiques arides ( $I < 5$ ) aux zones humides à forêt prépondérante ( $I > 40$ ) (**Figure 7A**).

La spatialisation de cet indice annuel à l'échelle de la France métropolitaine met clairement en évidence les zones les plus "arides" ( $I$ : 15 à 30) : la partie non montagneuse du pourtour méditerranéen (1), la région Parisienne (2) , l'Anjou (3), la plaine d'Alsace (4) et l'est de la Gascogne



**Figure 7.** Indice annuel de De Martonne (A) et Quotient pluviothermique d'Emberger (B). Les données sont calculées au pas kilométrique à partir des normales 1961-1990 du modèle AURELHY. Pour l'indice de De Martonne, les zones les plus "arides" (I: 15 à 30) sont notées sur la carte : la partie non montagneuse du pourtour méditerranéen (1), la région Parisienne (2), l'Anjou (3), la plaine d'Alsace (4) et l'est de la Gascogne (5). Pour le quotient pluviothermique d'Emberger, seul le bassin méditerranéen a été représenté car c'est le domaine de validité de l'indice.

De Martonne a également défini un indice utilisable à l'échelle mensuelle. Pour un mois donné caractérisé par une précipitation et une température moyennes  $p$  (en mm) et  $t$  (en °C), l'indice d'aridité mensuel est :

$$I = \frac{12p}{t + 10}$$

La pluviométrie est multipliée par 12 de façon à obtenir une valeur de l'indice comparable à celle de l'indice annuel. Ces indices expriment la sécheresse mais ne permettent pas de savoir à partir de quel moment un mois est vraiment "sec". Dans l'impossibilité de résoudre ce problème, différents seuils plus ou moins arbitraires ont été proposés. La valeur la plus couramment utilisée pour un mois sec est  $I \leq 20$  (ce qui correspond, par exemple, pour une température de 25°, à une pluviométrie de 60 mm).

#### 4.1.2 Quotient pluviothermique d'Emberger

L'indice d'Emberger prend en compte les précipitations annuelles  $P$ , la moyenne des maxima de température du mois le plus chaud ( $M$  en °C) et la moyenne des minima de température du mois le plus froid ( $m$  en °C) (Emberger, 1955). Il est particulièrement adapté aux régions méditerranéennes dans lesquelles il permet de distinguer différents étages climatiques. Dans ces régions, Emberger a remarqué que l'amplitude thermique ( $M-m$ ) est un facteur important de la répartition des végétaux. En

effet, à température moyenne égale, l'évaporation est d'autant plus grande que l'amplitude thermique est élevée. Le facteur de pluie pris en compte est le produit du nombre de jours de pluie par an ( $n$ ) par le cumul moyen annuel ( $P$ ). L'indice d'Emberger  $Q$  est donné par la formule :

$$Q = \left[ \frac{n * P}{[365 * (M^2 - m^2)]} \right] * 100$$

Si le nombre de jours de pluie  $n$  est inconnu, la formule simplifiée suivante est utilisée :

$$Q = \frac{100 * P}{(M^2 - m^2)}$$

Un climat méditerranéen est d'autant plus sec que le quotient est petit. La majorité des valeurs s'échelonnent dans le bassin méditerranéen entre 100 et 600 (**Figure 7B**). Il est à noter qu'à quotient équivalent, celui-ci à une valeur écologique différente selon les valeurs des températures qui y interviennent, les températures minimales ( $m$ ) représentant un seuil biologique.

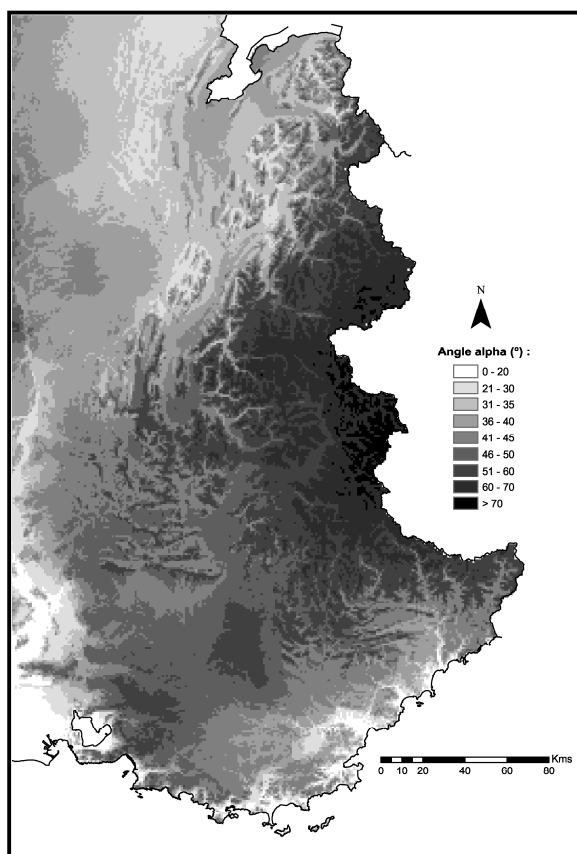
### **4.1.3 Angle de continentalité hydrique de Gams modifié par Michalet**

Cet indice concerne essentiellement les contextes de montagne (**Figure 8**). Il a été très utilisé pour étudier le climat des Alpes car il permet de s'affranchir des effets de l'altitude pour manifester la continentalité (Michalet, 1991). Pour une même altitude, les zones les plus externes d'un massif reçoivent davantage de pluie que les zones plus internes. Les nuages étant moins nombreux, ces dernières sont également plus ensoleillées et présentent des variations thermiques journalières et saisonnières nettement plus fortes. Cet angle  $\alpha$  est défini par :

$$\cot(\alpha) = \frac{P - \left( \frac{900 - A}{100} * \frac{P}{10} \right)}{A}$$

$P$  = pluviométrie totale annuelle (en mm) et  $A$  = altitude (en m)

L'angle augmente et tend vers 90° quand la pluviométrie diminue relativement à l'altitude du poste considéré. Les Alpes externes, fortement arrosées, correspondent à des angles < 40°, les Alpes intermédiaires à des angles compris entre 40 et 50° et les Alpes internes, faiblement arrosées à fort ensoleillement, à des angles supérieurs à 50°. Des études en cours dans le contexte alpin montrent que le mélèze est présent majoritairement dans les zones caractérisées par un angle supérieur à 50-55° (Alpes du nord interne, Alpes du sud intermédiaire et interne), et son optimum de présence correspond à un angle de 74°. L'abondance du sapin et du hêtre diminue fortement pour des angles > 50°. La moyenne est de 45° et l'optimum de présence correspond à un angle inférieur à 20° (zones externes et intermédiaires). Enfin, le chêne sessile se cantonne dans les zones de faible altitude (optimum 600 m) assez fraîches. L'angle moyen est de 40° et l'optimum 24°.



**Figure 8.** Angle de continentalité hydrique de Gams modifié par Michalet (1991). Les données sont calculées au pas kilométrique à partir de normales 1961-1990 du modèle AURELHY et du MNT.

#### 4.1.4 Calcul de l'ETP

Nous allons développer ici la méthode de bilan hydrique la plus simple, qui consiste à faire la différence (P-ETP) au pas de temps mensuel. Dans ce cas, on parlera généralement de « bilan hydrique potentiel » ou « climatique ». Ce bilan hydrique est le plus simple à spatialiser, la prise en compte de la réserve en eau maximale des sols étant abordée au chapitre suivant.

Telle qu'elle a été définie originellement, l'ETP correspond à la quantité d'eau maximale que peut restituer dans l'atmosphère un couvert végétal en pleine activité physiologique et en conditions non limitatives d'approvisionnement hydrique (Thornthwaite, 1948). Il est évident que si cette ETP dépend essentiellement du climat, les propriétés des surfaces évaporantes et les particularités anatomiques et physiologiques des espèces modulent également son intensité. Actuellement, la norme considère que l'évapotranspiration potentielle correspond à la consommation en eau d'un gazon couvrant, en phase de croissance active, sans restriction de son alimentation hydrique (Choisnel *et al.*, 1992). Même si le couvert de référence n'est pas celui susceptible d'évapotranspirer le plus, il est admis qu'il donne une estimation intéressante de la demande en eau qu'exerce le climat ("*demande climatique*"). En été, par exemple, les valeurs journalières de cette ETP sont couramment comprises entre 3 et 6 mm/jour. De nombreux auteurs ont cherché à exprimer l'ETP à partir de données climatiques plus simples en raison de la difficulté des mesures expérimentales directes de l'ETP "gazon" (à partir de cases lysimétriques à drainage ou pesable, etc).

Dans cette étude, seules trois formules simples d'utilisation et faciles à calculer par le praticien de terrain sont présentées : Thornthwaite, Turc et Hargreaves. Les moyennes trentenaires (1961-1990) de ces trois ETP ont été calculées mensuellement sous SIG. Les valeurs annuelles ont été cartographiées et comparées à l'échelle de la France métropolitaine.

#### 4.1.4.1 La formule d'ETP de Thornthwaite (1948)

La formule s'appuie sur des données facilement accessibles : la température moyenne de l'air et la durée théorique de l'insolation qui dépend de la saison et de la latitude. L'évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm) est donnée par :

$$ETP = 16 \times \left[ \frac{10 T_j}{I} \right]^a \times F$$

- $T_j$  = température moyenne mensuelle (°C)
- $I$  = indice thermique annuel, somme des 12 indices mensuels  $I_j$

$$I = \sum_{j=\text{janvier}}^{\text{décembre}} I_j \Rightarrow I_j = \left( \frac{T_j}{5} \right)^{1,514}$$

- $a$  = fonction de l'indice  $I$ :  
 $a = 6,75 \cdot 10^{-7} (I^3) - 7,71 \cdot 10^{-5} (I^2) + 1,792 \cdot 10^{-2} (I) + 0,49239$
- $F$  = terme correctif fonction de la durée théorique de l'insolation variant avec la latitude et la saison. Il cherche à représenter l'évolution des rayonnements solaires en fonction de la position géographique et de la période (**Tableau 3**)

L'ETP est nulle pour les températures inférieures à zéro. Pour des températures moyennes mensuelles supérieures à 26,5°C (zones arides), la formule de l'ETP est de la forme :

$$ETP \text{ (mm/mois)} = (-415,85 + 32,24 t - 0,43 t^2) * F.$$

Lat. N.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
39	0,85	0,84	1,03	1,11	1,23	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
41	0,83	0,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	0,96	0,82	0,8
42	0,82	0,83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	0,95	0,82	0,79
43	0,81	0,82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,2	1,04	0,95	0,81	0,77
44	0,81	0,82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,3	1,2	1,04	0,95	0,8	0,76
45	0,8	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
46	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74
47	0,77	0,8	1,02	1,14	1,3	1,32	1,33	1,22	1,04	0,93	0,78	0,73
48	0,76	0,8	1,02	1,14	1,31	1,33	1,34	1,23	1,05	0,93	0,77	0,72
49	0,75	0,79	1,02	1,14	1,32	1,34	1,35	1,24	1,05	0,93	0,76	0,71
50	0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,7

**Tableau 3.** Terme correctif mensuel  $F$  selon la latitude utilisé pour les estimations de l'évapotranspiration potentielle dans le cas de la formule de Thornthwaite.

Lat. S.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
40	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92	1,00	1,15	1,2	1,29
42	1,28	1,07	1,07	0,92	0,85	0,76	0,82	0,92	1,00	1,16	1,22	1,31
44	1,3	1,08	1,07	0,92	0,83	0,74	0,81	0,91	0,99	1,17	1,23	1,33
46	1,32	1,1	1,07	0,91	0,82	0,72	0,79	0,9	0,99	1,17	1,25	1,35
48	1,34	1,11	1,08	0,9	0,8	0,7	0,76	0,89	0,99	1,18	1,27	1,37
50	1,37	1,12	1,08	0,89	0,77	0,67	0,74	0,88	0,99	1,19	1,29	1,41

A partir des données spatialisées, on observe, en France, des valeurs de cumul annuel d'ETP Thornthwaite comprises entre 300 mm et 1000 mm (moyenne 1961-1990) (**Figure 9-A**). Les valeurs



diminuent vers le nord-est du pays, du fait de l'augmentation de latitude et de continentalité, ainsi qu'en montagne du fait de l'augmentation d'altitude. La période hivernale de novembre à février représente 8 % des ETP annuelles, le début de saison de végétation (de mars à mai) 22%, et la période d'été (de juin à septembre) 61%, avec un maximum moyen pour la France de 118 mm en juillet. Les ETP maximales atteignent 140 mm en juillet, sur le pourtour méditerranéen et dans le couloir Rhodanien, et jusque dans les basses vallées Alpines (Grésivaudan, combe de Savoie).

#### 4.1.4.2 La formule de Turc

La formule originale est utilisable à l'échelle journalière, décadaire ou mensuelle et prend deux formes selon l'humidité relative moyenne (Turc 1955, 1961).

Pour une humidité relative (Hr) > 50% (cas général des régions tempérées), on a :

$$ETP(mm / n \text{ jours}) = n * 0,013 * (R_g + 50) * \left( \frac{t}{t + 15} \right)$$

- n = période considérée (jour (n = 1), décade (n = 10), mois (n = 28, 29, 30 ou 31))
- t = température moyenne de l'air de la période (°C)
- R<sub>g</sub> = Rayonnement global en cal. cm<sup>-2</sup>. jour<sup>-1</sup>

Dans la formule présentée ci-dessus, si l'humidité (Hr) est inférieure à 50% il faut multiplier la valeur de l'ETP par un terme correctif (Lebourgeois et Piedallu, 2005).

En ce qui concerne le calcul du rayonnement solaire, il est recommandé d'utiliser des données calculées à l'aide d'un SIG selon les méthodes décrite précédemment.

En France, les ETP moyennes (1961-1990) calculées avec la formule de Turc s'échelonnent de 300 à 1100 mm pour les cumuls annuels (**Figure 9-B**). Les valeurs mensuelles les plus fortes dépassant les 150 mm pour le mois de juillet sur le pourtour de la méditerranée et dans l'arrière pays provençal, jusque dans la haute vallée de la Durance. Du fait de la prise en compte de la topographie dans le calcul, par le biais des radiations solaires, on retrouve les valeurs extrêmes en zone de montagne, ce qui est particulièrement visible dans les Alpes. La répartition saisonnière est sensiblement équivalente à celle observée avec les ETP Thornthwaite.

#### 4.1.4.3 La formule de Hargreaves

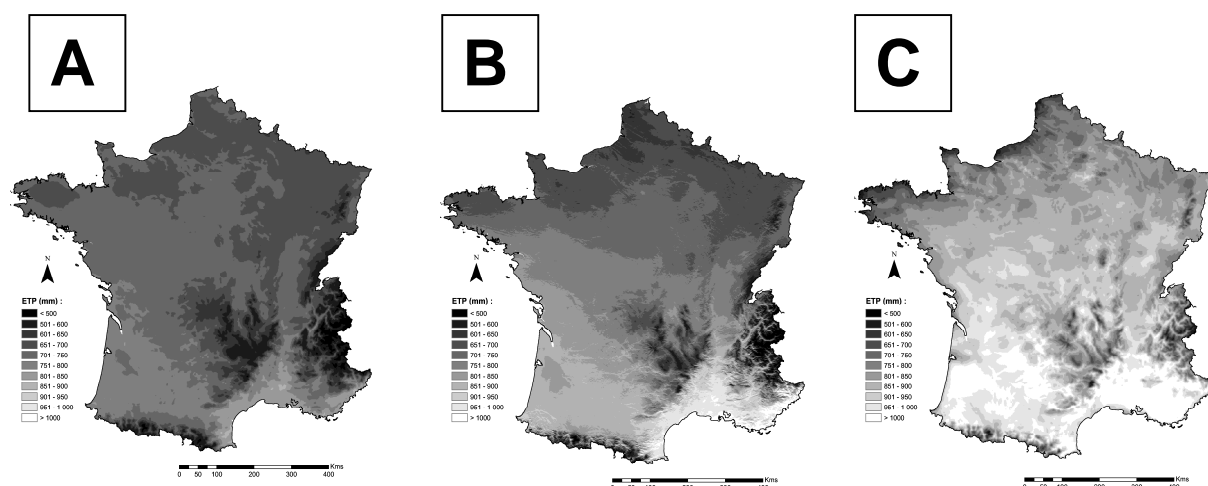
Cette formule est très bien adaptée aux zones tempérées pour estimer l'évapotranspiration potentielle journalière des systèmes agricoles (Hargreaves et Allen, 2003). Afin de réduire les biais relatifs aux variations journalières rapides de la vitesse du vent ou de la couverture nuageuse, Hargreaves et Allen (2003) recommandent d'utiliser la formule avec un pas de temps d'au moins 5 jours (cumuls sur au moins 5 jours des valeurs journalières). Cette formule, qui a été utilisée en 1997 pour élaborer un atlas climatique mondial, est de la forme :

$$ETP(mm / jour) = 0,0023 * Ra * (t + 17,8) * \sqrt{\Delta t}$$

- t = température moyenne(°C) ;
- Δt = amplitude thermique (T<sub>max</sub> - T<sub>min</sub>) en °C. Ce paramètre intègre indirectement l'effet de la couverture nuageuse car Δt décroît généralement avec l'augmentation de la nébulosité ;
- Ra = rayonnement extraterrestre exprimé en équivalent d'eau évaporée (mm/jour) (**Tableau 4**).

Lat. N.	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
40	6,22	8,25	11,16	14,12	16,21	17,08	16,66	14,96	12,28	9,22	6,73	5,63
40.5	6,09	8,13	11,07	14,07	16,20	17,08	16,65	14,92	12,20	9,11	6,61	5,50
41	5,96	8,01	10,97	14,01	16,18	17,08	16,64	14,88	12,12	9,00	6,49	5,38
41.5	5,84	7,89	10,88	13,95	16,16	17,09	16,63	14,84	12,04	8,89	6,36	5,25
42	5,71	7,77	10,78	13,89	16,14	17,08	16,63	14,80	11,96	8,77	6,24	5,12
42.5	5,58	7,65	10,68	13,83	16,11	17,08	16,61	14,76	11,87	8,66	6,11	4,99
43	5,45	7,53	10,59	13,77	16,09	17,08	16,60	14,71	11,79	8,55	5,99	4,86
43.5	5,33	7,41	10,49	13,71	16,07	17,07	16,59	14,67	11,71	8,44	5,86	4,73
44	5,20	7,29	10,39	13,65	16,04	17,07	16,57	14,62	11,62	8,32	5,73	4,60
44.5	5,07	7,17	10,29	13,58	16,01	17,06	16,56	14,57	11,53	8,21	5,60	4,47
45	4,94	7,04	10,18	13,52	15,98	17,05	16,54	14,52	11,45	8,09	5,48	4,34
45.5	4,81	6,92	10,08	13,45	15,95	17,04	16,52	14,47	11,36	7,98	5,35	4,21
46	4,68	6,80	9,98	13,38	15,92	17,03	16,50	14,42	11,27	7,86	5,22	4,08
46.5	4,55	6,67	9,88	13,32	15,89	17,02	16,48	14,37	11,18	7,74	5,09	3,95
47	4,41	6,55	9,77	13,25	15,86	17,00	16,46	14,31	11,09	7,62	4,96	3,82
47.5	4,28	6,42	9,67	13,18	15,82	16,99	16,44	14,26	11,00	7,50	4,83	3,69
48	4,15	6,30	9,56	13,11	15,79	16,97	16,41	14,20	10,91	7,39	4,70	3,55
48.5	4,02	6,17	9,45	13,03	15,75	16,95	16,39	14,15	10,81	7,27	4,57	3,42
49	3,89	6,04	9,35	12,96	15,71	16,94	16,36	14,09	10,72	7,15	4,44	3,29
49.5	3,75	5,92	9,24	12,89	15,67	16,92	16,33	14,03	10,62	7,03	4,31	3,16
50	3,62	5,79	9,13	12,81	15,63	16,89	16,30	13,97	10,53	6,90	4,18	3,02
50.5	3,49	5,66	9,02	12,73	15,59	16,87	16,27	13,91	10,43	6,78	4,04	2,89
51	3,35	5,53	8,91	12,66	15,55	16,85	16,24	13,85	10,34	6,66	3,91	2,76
51.5	3,22	5,40	8,80	12,58	15,51	16,82	16,21	13,78	10,24	6,54	3,78	2,62

En France, les valeurs d'ETP calculées avec la formule de Hargreaves varient pour l'année entre 500 et 1200 mm (Figure 9-C). Le gradient Sud-Ouest/Nord-Est observé précédemment avec les calculs de Thornthwaite et Turc s'estompe, au profit d'une différenciation Nord/Sud dans laquelle apparaît l'influence côtière, notamment le long de la Manche. Les valeurs les plus fortes obtenues pour le mois de juillet dépassent les 180 mm dans l'arrière pays Provençal, le Gapençais, et au pied des Cévennes.



**Figure 9.** Evapotranspiration potentielle (ETP) moyenne annuelle calculée à partir du SIG au pas kilométrique selon la formule de Thornthwaite (A), Turc (B) et Hargreaves (C). Les normales de températures 1961-1990 du modèle AURELHY ont été utilisées pour les 3 calculs, ainsi que les radiations du modèle Helios (Piedallu et Gégout, 2006) pour l'ETP Turc.

La cartographie de ces différents indices permet de voir au premier abord des différences notables en terme de caractérisation de la sécheresse et de la « demande climatique » estimée par les calculs des ETP.

## **4.2 Prise en compte de la réserve utile des sols dans le calcul du bilan hydrique** (réalisé par l'ENGREF, collaboration de l'IFN pour la fourniture des données relevées sur ses points d'inventaire)

Les calculs réalisés précédemment permettent l'élaboration de bilan hydrique à partir de facteurs uniquement climatiques. On parle alors de bilan hydrique climatique, cette approche simplifiée ne prenant pas en compte le facteur sol. En effet, pour une approche plus précise, on doit tenir compte de la capacité du sol à retenir et à stocker l'eau. Le calcul du bilan hydrique passe alors par l'estimation des réserves en eau maximales des sols (RUM), on parle alors de bilans hydriques édaphiques. Il n'existe actuellement pas de données spatialisées décrivant les réserves en eau de façon précise, empêchant la spatialisation des bilans hydriques édaphiques. Aussi, nous allons dans un premier temps chercher à cartographier au mieux les RUM. Ce travail donne actuellement lieu à l'écriture d'un premier article scientifique traitant de la spatialisation des réserves en eau des sols, qui sera prochainement soumis dans une revue internationale et dont la référence provisoire est la suivante : Piedallu C., Gégout J.C., Seynave I., Cluzeau C., A soil water holding capacity large scale map for vegetation modelling. Au moins un autre article concernant le calcul des bilans hydriques est prévu à moyenne échéance.

### **4.2.1 Calcul de la réserve utile maximale des sols**

#### **4.2.1.1 Objectifs et choix de la base de données**

##### **4.2.1.1.1 Contexte général**

L'eau dans le sol est reconnue comme étant un des plus importants facteurs écologiques pour la croissance des espèces, influençant de nombreux paramètres dont la photosynthèse ou l'activité microbienne (Durner and Zipprich, 2002; Zheng et al., 1996). La réserve utile maximale des sols (RUM) représente la quantité d'eau maximale qu'un sol peut stocker et qui peut être utilisée par la plante. Il s'agit donc d'un composant essentiel du bilan hydrique, mais c'est aussi un des facteurs les plus difficiles à évaluer, du fait du manque de données (Vanderlinden et al., 2005), son estimation demandant de coûteuses analyses en laboratoire (Wosten et al., 1999) ou la mise en place de dispositif assez complexe de mesures d'humidité des sols (TDR, sondes à neutron...).

De nombreuses études se sont focalisées sur le développement de fonctions de pédotransfert (FPT), permettant de prédire des fonctions hydrauliques complexes à partir de paramètres facilement relevés sur le terrain. Les plus simples de ces FPT sont les classes de pédotransfert (FPTC), qui fournissent des valeurs moyennes concernant les propriétés hydrauliques par classes taxonomiques. La plupart des études se sont intéressées au développement de FPT continues, liant la texture du sol, la densité apparente, ou la matière organique des sols, à des paramètres hydrauliques, à l'aide d'équations. De nombreuses comparaisons de ces FPT ont été publiées, montrant des résultats variables en fonction de la méthode de calcul et de la localisation (Cornelis et al., 2001; Givi et al., 2004; Schaap et al., 2001; Wagner et al., 2001). L'utilisation de FPT continues demande de nombreuses variables en intrant, parfois non disponibles, mais semble présenter une meilleure qualité de prédiction que les FPTC (Van Alphen et al., 2001). Cependant, d'autres auteurs (Wosten et al., 1995) ont montré que le choix entre FPT continues et FPTC n'était pas si évident pour réaliser des calculs concernant les aspects fonctionnels des sols. D'autres auteurs (Nemes et al., 2003) se sont intéressés à l'origine géographique des bases de données ayant servi à réaliser les FPT, et ont trouvé de faibles différences dans les résultats entre des bases de données développées localement et des bases de données couvrant de plus larges emprises. Cependant, en général, les FPT développées à partir de sols identiques à ceux qui sont présents sur la zone d'étude donnent les meilleurs résultats (Rawls et al., 2001; Schaap et al., 2001).

Actuellement, la plupart des études s'intéressent à la création et à la validation de FPT et peu d'entre elles s'intéressent aux caractéristiques des sols prédites et à leur utilisation possible pour modéliser la végétation (Nemes et al., 2006). Peu de recherches se sont penchées sur l'utilisation des FPT pour cartographier les paramètres des sols, malgré un intérêt évident pour les études écologiques et la gestion forestière (Orfanus and Mikulec, 2005; Romano and Santini, 1997; Vanderlinden et al., 2005). Dans les zones forestières, la relation entre la RUM et la distribution ou la fertilité des essences est connue depuis longtemps, l'eau du sol apparaissant d'ailleurs dans de nombreux catalogues de stations forestières comme un facteur clef, mais le manque de données disponibles sur de larges surfaces, et ayant une bonne précision locale, est une limite forte. De plus, la validité des estimations de RUM sur les sols forestiers n'est que très peu documentée, du fait que la majorité des échantillons utilisés pour calibrer les FPT proviennent de sols agricoles, dont les caractéristiques sont différentes (Vincke and Delvaux, 2005).

Dans ce contexte, notre objectif est d'étudier la possibilité d'utiliser un grand nombre de relevés plus ou moins complets pour élaborer une carte des RUM à l'échelle du territoire français. Dans un premier temps nous évaluons l'intérêt d'utiliser les bases EcoPlant et de l'IFN pour prédire la RUM. Ensuite, nous comparons l'usage de différentes FPT pour évaluer la RUM sur les points de relevés. Nous testerons également la prise en compte de la seule profondeur, le paramètre le plus facile à relever sur le terrain, ainsi que différentes méthodes de prise en compte de la charge en cailloux. Dans un troisième temps, nous sélectionnerons la meilleure méthode de calcul de la RUM pour réaliser la cartographie.

#### **4.2.1.1.2 Comparaison des données d'EcoPlant et de la base IFN**

L'objectif de cette étape est de sélectionner la base de données la plus propice à la spatialisation des RUM, entre la base EcoPlant de l'ENGREF et la base écologiques de l'IFN. EcoPlant comprend un nombre de relevés moins important que l'IFN à l'échelle nationale, mais les mesures sont a priori plus précises. Les données permettant de calculer la RUM dans EcoPlant sont pour chaque horizon la profondeur et la texture analysée en laboratoire, les classes de texture étant codées selon le triangle de Jamagne. Pour la fosse pédologique nous avons l'estimation de la charge en cailloux et la profondeur totale. Une grande majorité des fosses sont réalisées à la pioche jusqu'au blocage ou arrêt à la profondeur prospectable par les racines si la roche mère n'est pas atteinte. Il existe 3500 relevés répartis aléatoirement sur toutes les forêts de France, avec une densité plus importante dans le nord voire le nord est que dans le sud.

Les relevés de l'IFN sont quant à eux beaucoup plus nombreux mais a priori moins précis. On a environ 100 000 relevés sur la France sélectionnés selon un échantillonnage stratifié aléatoire, sur la base d'une maille systématique de 500 \* 625 m en milieu forestier. Sur chaque placette est caractérisée la proportion de surface en affleurements rocheux, et une fosse est réalisée, combinant travail à la pioche et sondage à la tarière. Des différences de protocole peuvent être observées régionalement. La fosse est creusée sur une profondeur maximale de 1 m, et permet d'estimer la charge en cailloux et la texture sur deux horizons au maximum. Pour chacun de ces horizons la profondeur est estimée par section de 10 cm et les classes de texture sont estimées au toucher selon 9 classes : sables, sables limoneux, sables argileux, limons sableux, limons, argiles limoneuses, argiles sablo limoneuses, et argiles. Ces classes ne correspondent pas exactement à celles des triangles de textures utilisés en France ou à l'échelle internationale.

Pour comparer les possibilités de chacune des bases, nous avons sélectionné un jeu de données permettant de calculer des RUM selon la méthode de Jamagne (Baize and Jabiol, 1995), dans le massif Vosgien (8800 km<sup>2</sup>, description complète du protocole et du site d'étude voire (Piedallu et al.,

2006). Les RUM ainsi estimées ont été modélisées par régression linéaire avec des variables climatiques, topographiques et géologiques.

Pour Ecoplant 1719 placettes ont été sélectionnées avec une précision de localisation inférieure ou égale à 50 mètres. Trois types de variables interviennent dans le modèle : des variables géologiques (les grès vosgiens, les conglomérats principaux, les grès intermédiaires et les grès à coquilliers), des variables topographiques caractérisant le caractère montagneux du site et la distance à la crête, ainsi que des variables climatiques comme l'ETP de février ou l'indice de DeMartonne. On obtient un R<sup>2</sup> de 0.43.

En ce qui concerne la base écologique de l'IFN, 3674 relevés sont présents sur le site d'étude. On obtient un modèle de réserve utile qualifié par un R<sup>2</sup> également de 0.43 (**Tableau 5**) et qui est déterminé à la fois par des variables topographiques et géologiques (**Figure 10**). Trois indices topographiques sont significatifs, dont des indices caractérisant le caractère montagneux du site sur des emprises plus ou moins larges (rayons de 250 ou de 2000 mètres). Ces indices indiquent que la RUM sera d'autant plus élevée si la topographie est plane à fine échelle (rayon de 250 mètres) et à échelle un peu plus large (rayon de 2000 mètres), augmentant les valeurs de réserve utile dans les plaines, fonds de vallées ou sur des petits plateaux ou des replats de versant. Cet indice est pondéré par la distance à la crête, la valeur de RUM est d'autant plus forte qu'on est éloigné de la crête. Un certain nombre de substrats interviennent également positivement ou négativement sur la réserve utile. La présence de conglomérat principal acide diminue de 32 mm la réserve en eau, la présence de grès vosgiens acides de 18 mm, tandis que les roches sédimentaires basiques augmentent la RUM de 18 mm et les grès coquilliers neutres l'augmentent de 30 mm. Ces valeurs sont cohérentes avec les connaissances granulométriques dont on dispose sur ces roches (pour de plus amples informations sur les variables utilisées consulter le rapport (Piedallu et al., 2006).

Variable	Modalité	Coeff.	t-value	Sign.
Constante		104,266	50,86 1	0,000
Indice de Dénivellation sur un rayon de 250 m.		-0,188	- 13,09 6	0,000
Indice de Dénivellation sur un rayon de 2000 m.)		-4,645 <sup>E-2</sup>	-9,487	0,000
Distance euclidienne à la crête (m.)		5,151 <sup>E-3</sup>	10,08 3	0,000
Géologie	Conglomérat principal acide	-32,607	-9,711	0,000
	Grès Vosgiens acides	-18,645	- 10,73 3	0,000
	Grès intermédiaires moyennement acide	-12,733	-4,892	0,000
	Grès à Voltzia moyennement acide	14,949	5,889	0,000
	Roches sédimentaires basiques	18,585	4,960	0,000
	Grès coquilliers neutres	30,585	8,533	0,000

**Tableau 5.** Modélisation de la réserve utile avec le jeu IFN (R<sup>2</sup> 0.433)

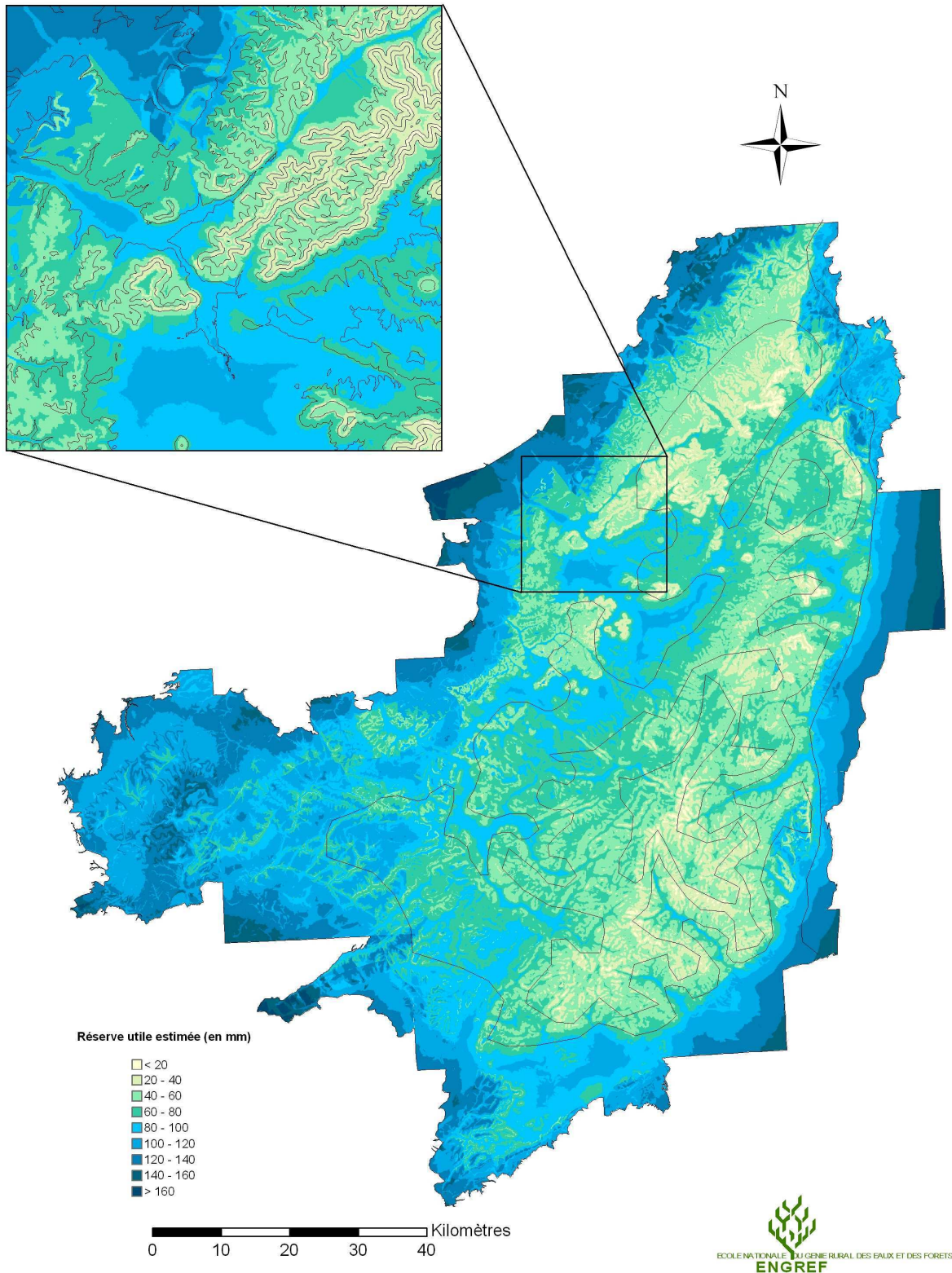


Figure 10. Cartographie de la RUM sur les Vosges à partir des données de l'IFN.

On constate que les modèles font intervenir des variables ayant un sens similaire et sont qualifiées par un R<sup>2</sup> identique. La supposée moindre précision des relevés IFN, dont la texture est estimée au toucher, est probablement compensée par la forte densité de l'échantillon, et par l'utilisation d'un protocole homogène sur tout le territoire. Les données d'Ecoplant, moins nombreuses mais issues d'analyse en laboratoire et donc certainement plus précises, sont peut être pénalisées par un effet opérateur, aucun protocole harmonisé n'ayant été appliqué à des relevés réalisés dans le cadre d'études différentes.

Les incertitudes concernant l'utilisation de données IFN simplifiées ont été levées. Le site étudié, le massif Vosgien, correspond à une des zones de plus forte densité des données Ecoplant. Si les résultats sont similaires en utilisant l'une ou l'autre de ces bases, la base IFN offre l'avantage d'avoir une pression d'échantillonnage identique sur tout le territoire, ce qui n'est pas le cas d'Ecoplant. On pourrait donc s'attendre à des problèmes de modélisation ou encore plus d'interpolation dans des zones de moindre densité de relevés, comme le sud de la France. Aussi, nous décidons de choisir la base IFN pour la suite de l'étude.

#### **4.2.1.2 Méthode de calcul de la RUM**

##### **4.2.1.2.1 Identification des classes de FPT et calculs préparatoires**

Nous avons identifié 4 classes différentes de FPT élaborées en France ou sur un territoire plus vaste recouvrant la France. Il s'agit des FPT de Jamagne (Jamagne et al., 1977), Bruand (Bruand et al., 2002), Rosetta (Schaap et al., 2001), et HYPRES (Wosten et al., 1999). La base de données des sols de Jamagne concerne des relevés localisés dans le département de l'Aisne. Des valeurs de réserve en eau sont fournies pour 16 classes texturales. Bruand (Bruand et al., 2002) a analysé les données de Jamagne et a estimé que le potentiel matriciel utilisé pour le calcul de la RUM correspond à pF = 2 pour la capacité au champ et pF = 4.2 pour le point de flétrissement. Les échantillons de sol ont été séchés et filtrés à 2 mm, induisant des imprécisions dans les analyses (destruction de la structure). Cependant, les FPT de Jamagne sont largement utilisées actuellement en France. Bruand a calculé ses propres FPT 25 ans après, avec une base de données de 219 horizons localisés dans le bassin Parisien, le piémont Pyrénéen, et l'est de la France, avec une mesure de la densité apparente des mottes permettant de prendre en compte l'effet de la porosité. Bruand a publié des teneurs en eau volumiques à différents potentiels matriciels pour 8 classes de texture. Nous les avons utilisées pour calculer la teneur en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ en utilisant les potentiels matriciels 1,5 et 4,2. ( $\theta_{1,5}$  and  $\theta_{4,2}$ ).

Nous nous sommes également intéressés à deux bases de données développées à plus large échelle, et qui fournissent les paramètres  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $\alpha$  and  $n$  pour différentes classes texturales, permettant d'estimer l'eau contenue dans le sol et utilisant la fonction de Van Genuchten (van Genuchten) :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-1/n}}$$

où  $\theta(h)$  est la teneur en eau volumique (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) à la pression  $h$  (cm),  $\theta_s$  et  $\theta_r$  sont la teneur en eau à saturation et résiduelle (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>),  $\alpha$  (cm<sup>-1</sup>) est la pression d'entrée d'air et  $n$  le paramètre de forme de Van-Genuchten.

La fonction de Van genuchten permet de calculer la teneur en eau entre la capacité au champ et le point de flétrissement en soustrayant la teneur en eau à -330 Hpa et à -1500 Hpa pour chaque classe de texture. Le premier calcul a été réalisé avec HYPRES, the Hydraulic Properties of European

Soils database. HYPRES est une base de données européenne, pour laquelle une vingtaine d'institution ont contribué à fournir 5521 échantillons dont 171 viennent de France. Les données provenant de différents pays ont été standardisées pour être rendues compatibles entre elles, et les paramètres de Van Genuchten sont fournis pour 5 classes de texture, en distinguant des horizons de surface et de profondeur. La seconde base supra-nationale utilisée provient de ROSETTA, un programme informatique permettant d'estimer la teneur en eau avec 5 niveaux hiérarchiques de FPT. Le premier niveau est appelé H1 et fournit une table de correspondance entre 12 classes de texture et des paramètres hydrauliques moyens par classe. La base de données ayant servi à son élaboration contient 2134 relevés de sols d'Amérique du nord et d'Europe.

Différentes classifications des textures ont été utilisées pour élaborer les classes de pédotransfert, il est nécessaire de les harmoniser et de les rendre compatibles avec celle de la base de données de l'IFN. Trois cas peuvent se produire :

- une classe IFN correspond à une classe de FPT, alors nous affectons à la classe IFN la valeur correspondante,
- plusieurs classes de FPT correspondent à une classe IFN, elles doivent alors être groupées, et la teneur en eau moyenne est considérée,
- une classe IFN appartient à différentes classes de FPT, alors la teneur en eau sera calculée au prorata de la surface occupée dans chaque FPTC.

Cette opération permet d'obtenir une valeur de rétention pour chacune des 9 classes IFN et pour les 4 FPTs considérées (**Tableau 6**).

IFN	Jamagne	Bruand	Wosten		Rosetta H1		
Classe texture	de RUM	RUM	RUM surf.	RUM prof.	RUM	MOY.	ET.
1 sables	0,7	1,41	1,1	0,73	0,02	0,79	0,52
2 Sables limoneux	1	1,68 *	1,235 *	0,985 *	0,79 *	1,14	0,34
3 Sables argileux	1,35	1,56	1,235 *	0,985 *	1,18	1,26	0,21
4 Limons sableux	1,4 *	1,87 *	1,37	1,24	1,77 *	1,53	0,27
5 Limon argileux	1,95	1,86	1,86	1,68	1,84	1,84	0,10
6 limon	1,75	1,86 **	1,86	1,68	2,16	1,86	0,18
7 Argile limoneuse	1,8	1,28	1,555 *	1,38 *	1,47	1,50	0,20
8 Argile sablo limoneuse	1,7 *	1,19 *	1,34 *	1,20 *	1,14	1,31	0,23
9 argile	1,7	1,47	1,53	1,09	1,43	1,44	0,22

**Tableau 6.** RUM (mm/cm) par classe de texture de l'IFN pour les 4 bases de données Jamagne, Bruand, Wosten et Rosetta (MOY = moyenne, ET = écart type)

#### 4.2.1.2.2 Prise en compte de la charge en cailloux et calcul de la RUM

Nous avons utilisé les 4 FPTC sélectionnées pour calculer la RUM pour la totalité du profil de sol. Pour cela il est nécessaire d'estimer la charge en cailloux. Trois méthodes ont été comparées :

- La charge en cailloux (CC) est calculée en soustrayant de la profondeur du sol le pourcentage de cailloux visible dans la fosse pédologique, comme cela est couramment pratiqué dans de nombreuses études (Vanderlinden et al., 2005) :

$$RUM1 = \left(1 - \frac{CC}{100}\right) \sum_{h=1}^H \theta_{-33kPA} - \theta_{-1500kPA} D_h$$



Avec RUM = réserve utile maximale, h = horizon,  $\theta_{-33kPA}$  = teneur en eau volumique à la capacité au champ,  $\theta_{-1500kPA}$  = teneur en eau volumique au point de flétrissement, CC = charge en cailloux en % et  $D_h$  = épaisseur de l'horizon h

- nous avons ensuite transformé la charge en cailloux estimée à la surface de la fosse pédologique en un cube dont les dimensions représentent la proportion de cailloux. Par exemple, une charge en cailloux de 20% représente un cube de 20 \* 20 \* 20 cm pour une fosse de 1 m. La formule est alors :

$$RUM2 = \left(1 - \frac{\sqrt{CC}^3}{100}\right) \sum_{h=1}^H \theta_{-33kPA} - \theta_{-1500kPA} Dh$$

- le troisième calcul intègre les affleurements rocheux (AR) quand ils sont présents, en leur absence la formule RUM2 est utilisée. Nous considérons les affleurements rocheux comme un volume rectangulaire de rocher dont la largeur et la longueur correspondent à la proportion d'affleurements rocheux dans un mètre carré, et la profondeur correspond à celle de la fosse. Ce volume est d'abord soustrait au volume total de sol, ensuite le volume de cailloux calculé selon la formule de RUM2 est soustrait du volume de terre restant :

$$RUM3 = \left(1 - \frac{AR}{100}\right) - \left(\sqrt{CC}^3 * \left(1 - \frac{RO}{100}\right)\right) \sum_{h=1}^H \theta_{-33kPA} - \theta_{-1500kPA} Dh$$

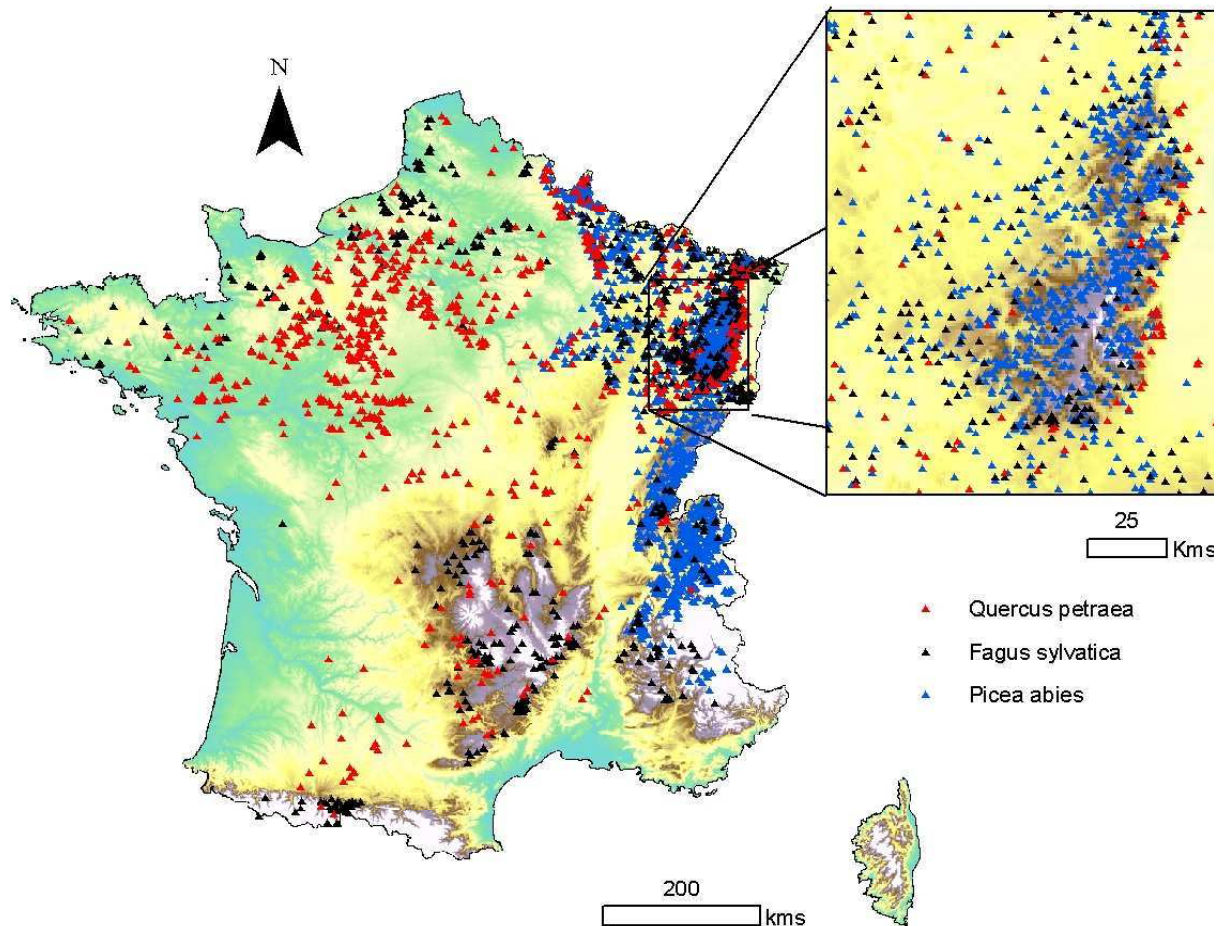
La combinaison des 4 classes de pédotransferts et des 3 méthodes de calcul de la RUM permet d'obtenir 12 estimations de la RUM qui vont être comparées.

#### **4.2.1.3 Choix de la meilleure méthode de calcul de la RUM**

Nous avons choisi de comparer les différentes méthodes de calcul de la RUM en testant leur capacité prédictive sur la productivité des espèces, sur la base de précédentes études qui ont montré un effet de la teneur en eau sur la fertilité (Bravo-Oviedo and Montero, 2005; Coops and Waring, 2001; Mitsuda et al., 2007). Nous avons utilisé les indices de fertilité calculés en France par Seynave pour trois espèces couramment rencontrées en France, *Picea abies*, *Fagus sylvatica* et *Quercus petraea* (Seynave et al., 2004a; Seynave et al., 2004b). Elle a montré dans ses études, à travers la modélisation de l'indice de fertilité avec des indices édaphiques et climatiques, un effet de la teneur en eau pour chacune de ces essences. L'indice de fertilité est calculé comme étant une hauteur dominante à un âge de référence, et a été estimé pour des peuplements purs et équiennes. Cet indice est un des plus couramment utilisés aujourd'hui, permettant de comparer la distribution spatiale de la productivité des espèces. Nous avons utilisé ces indices de fertilité calculés pour la France sur un échantillon de placettes IFN, et représentant 816 placettes pour *Fagus sylvatica*, 2066 placettes pour *Picea abies*, et 871 placettes pour *Quercus petraea* (**Figure 11**).

Pour chacune des essences, nous avons calculé la RUM selon les 4 PTFC sélectionnées et 3 méthodes de prise en compte de la charge en cailloux, puis nous avons établi de régressions linéaires entre les 12 estimations de la RUM et les indices de fertilité mesurés sur les placettes (**Tableau 7**). Une transformation logarithmique a été réalisée sur les estimations de RUM, les résultats apparaissant sensiblement meilleurs. Tout d'abord, on constate une similitude forte des logiques pour chacune des trois essences, montrant ainsi une uniformité des résultats, et validant le choix de l'indice de fertilité de ces essences comme étalon. Ensuite, nous constatons une variabilité très forte du pouvoir explicatif de la RUM selon la méthode de calcul utilisée. Pour chacun des trois essences, ROSETTA H1 donne les moins bons résultats, les meilleurs calculs étant pour chacune des trois essences et dans l'ordre Bruand, HYPRES, Jamagne. Bien qu'agissant plus faiblement, la méthode

de prise en compte de la charge en cailloux influe sensiblement sur la qualité du calcul. Là aussi, les résultats sont uniformes pour chacune des trois essences, la méthode 3 intégrant les affleurements rocheux arrivant en tête devant la méthode 2 puis 1. Nous constatons également que la seule profondeur de sol permet d'obtenir des résultats très corrects et même supérieurs à Rosetta H1 voire Jamagne. Nous sélectionnons donc le calcul utilisant les PTFC de Bruand méthode de calcul 3, que nous appellerons désormais Bruand3.



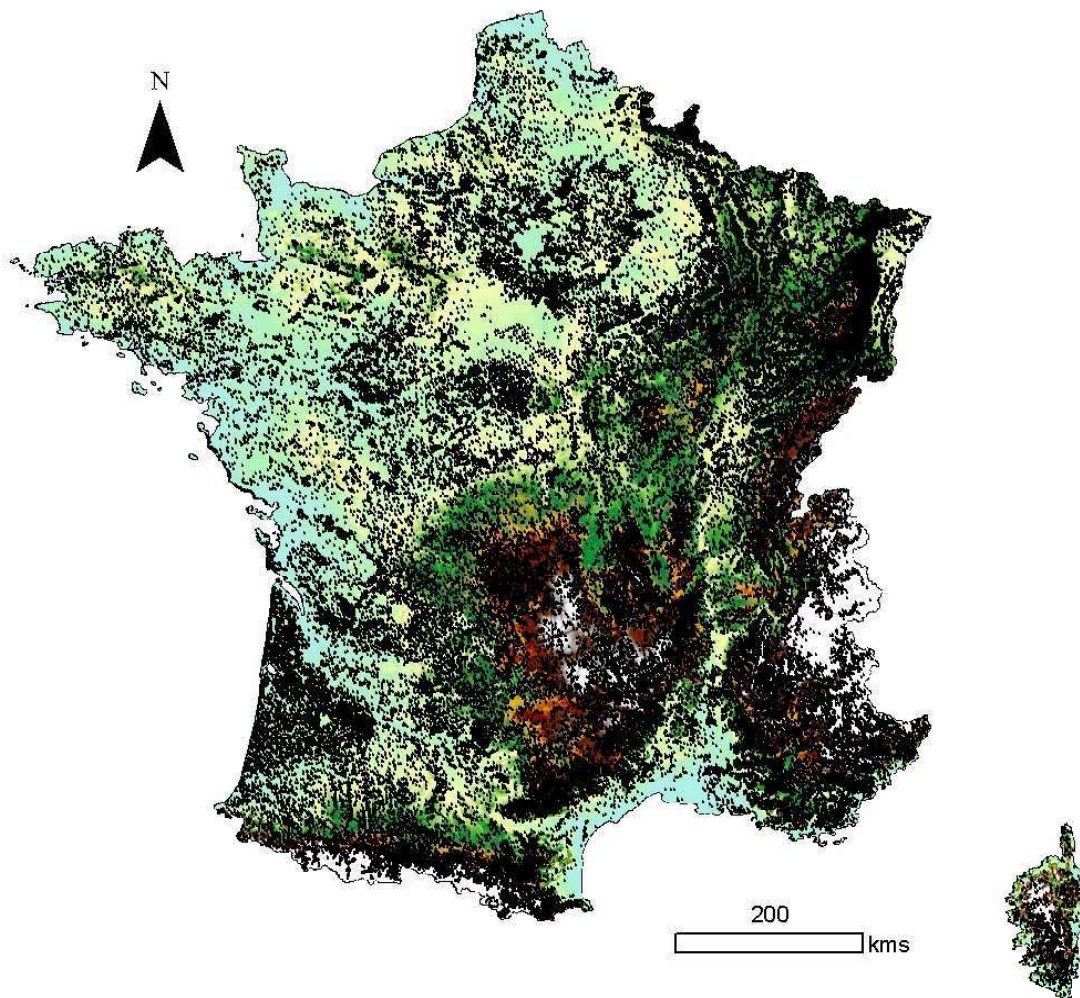
**Figure 11.** Localisation des placettes pour lesquelles l'indice de fertilité a été calculé pour *Quercus petraea* (n = 876), *Fagus sylvatica* (n = 816), et *Picea abies* (n = 2066, avec un zoom montrant le massif Vosgien).

Fagus sylvatica				Picea abies				Quercus petraea			
	1	2	3		1	2	3		1	2	3
Jamagne	0,067	0,058	0,100	Jamagne	0,094	0,090	0,158	Jamagne	0,087	0,082	0,104
Bruand	0,085	0,079	0,120	Bruand	0,153	0,154	0,216	Bruand	0,102	0,098	0,122
Rosetta-H1	0,000	0,000	0,005	Rosetta-H1	0,012	0,008	0,037	Rosetta-H1	0,039	0,031	0,042
HYPRES	0,083	0,076	0,118	HYPRES	0,125	0,124	0,190	HYPRES	0,095	0,090	0,114
Soil depth	0,069			Soil depth	0,144			Soil depth	0,074		

**Tableau 7.** Coefficient de corrélation  $R^2$  entre l'indice de fertilité calculé sur les relevés IFN pour *Fagus sylvatica*, *Picea abies* et *Quercus petraea* et le log de la RUM calculé avec différentes FPTC et méthode de prise en compte de la charge en cailloux (n = 816 pour *Fagus sylvatica*, n = 2067 pour *Picea abies*, n = 871 pour *Quercus petraea*).

#### 4.2.1.4 Cartographie de la RUM

Une fois le choix de la base de données et de la méthode de calcul réalisé, la RUM selon Bruand3 a été calculée sur 100306 relevés de l'IFN couvrant la France entière (**Figure 11**).



**Figure 11** : Localisation des 100306 placettes relevées par l'IFN et pour lesquelles les RUM ont été calculées.

Nous avons ensuite utilisé des techniques de géostatistiques pour réaliser la carte. Les géostatistiques permettent d'estimer les valeurs d'un paramètre à un endroit ou il n'a pas été mesuré, en utilisant un jeu de données réparties dans l'espace. Le module de géostatistiques d' ARCGIS 8.2 a été utilisé. Nous avons utilisé la technique du krigeage ordinaire, qui est une des techniques d'interpolation les plus utilisées. Les relevés de l'IFN pour lesquels des indices de fertilité ont été calculés et qui servent à la validation ont été enlevés du jeu de données servant à réaliser la carte.

La question de la résolution optimale de la carte se pose inévitablement. La résolution représente la taille de la cellule calculée à l'issue de la procédure de krigeage, notre objectif étant d'optimiser la taille de la cellule afin de prédire le plus exactement possible la RUM en un point. Une carte à large résolution est rapide à calculer et facile à manipuler, mais les données ont moins de détail qu'à fine résolution, et on peut soupçonner qu'elle ait une précision et une capacité prédictive vis à vis de la végétation moindre. Pour tester cela, nous avons construit 9 cartes à différentes résolutions : 50, 100,

250, 500 m, 1, 2.5, 5, 10 et 25 kms. Nous avons établis des corrélations entre les RUM obtenues à travers ces cartes et les indices de fertilité pour *Fagus sylvatica*, *Picea abies* et *Quercus petraea* (**Tableau 8**).

	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2500</b>	<b>5000</b>	<b>10000</b>	<b>25000</b>
RUBR4_point	0,642	0,641	0,637	0,631	0,612	0,570	0,520	0,426	0,265
fasy	0,125	0,124	0,123	0,123	0,120	0,118	0,111	0,102	0,129
piab	0,209	0,209	0,207	0,206	0,200	0,190	0,164	0,134	0,035
qupe	0,168	0,168	0,167	0,168	0,166	0,146	0,130	0,088	0,048

**Tableau 8.** Coefficient de corrélation  $R^2$  entre le log de la RUM calculé selon la méthode Bruand-3 et les cartes interpolées à différentes résolutions et i- les calculs réalisés sur les points IFN, noté RUBR4\_point (n = 100306) ii- les indices de fertilité calculés pour *Fagus sylvatica* (n = 816), *Picea abies* (n = 2066), et *Quercus petraea* (n = 876).

La comparaison entre les valeurs interpolées et les calculs réalisés sur les points IFN (RUBR4\_point) doit être considérée à titre indicatif. En effet, la validation avec un jeu de données de RUM estimées sur le terrain totalement indépendant du jeu ayant servi à faire la carte serait nécessaire pour avoir un jugement totalement objectif. Cependant, l'analyse impliquant les points IFN et les indices de fertilité donnent des résultats similaires : on obtient une dégradation importante du pouvoir prédictif de la carte au-delà d'une résolution kilométrique. Les meilleurs résultats sont observés pour une résolution de 50 mètres, sachant que la dégradation est faible entre 50 et 1000 mètres (0.5 % de la variance expliquée pour le hêtre, 1 % pour l'épicéa, et 0.2 % pour le chêne sessile). Vu ces résultats, nous avons choisi de calculer la carte finale à une résolution de 50 mètres de côté (**Figure 12**).

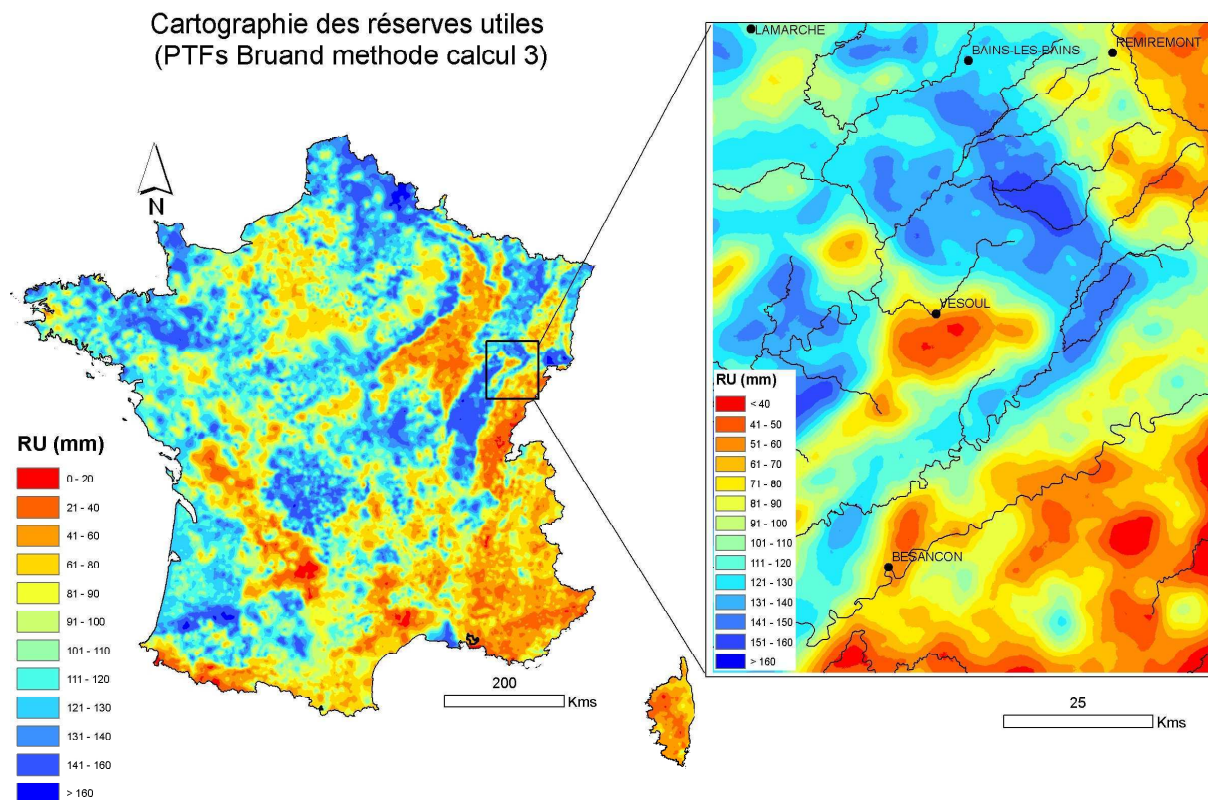


Figure 12. RUM cartographiée sur la France à partir des données IFN en utilisant la méthode Bruand-3, avec une résolution de 50 m de côté.

#### 4.2.2 Calcul des bilans hydriques édaphiques (réalisé par l'ENGREF)

Lors des travaux précédemment réalisés, nous avons calculé des bilans hydriques climatiques, représentant une différence entre les apports en eau (la pluie) et les ETP. Cette méthode de calcul, couramment utilisée, est en fait une simplification du calcul de bilan hydrique qui intègre normalement la RUM du sol. Cependant, la RUM étant une variable peu souvent disponible, particulièrement sous forme de carte, le bilan hydrique climatique est calculé par défaut. De ce fait, les indices caractérisant les bilans hydriques édaphiques sont peu utilisés dans les modèles de distribution ou de fertilité, car il est nécessaire d'avoir des mesures de RUM sur chacune des placettes pour pouvoir le calculer, ce qui est rare, surtout quand on travaille sur de larges emprises. La réalisation d'une carte des RUM du sol ouvre donc la porte des calculs spatialisés de bilans hydriques édaphiques.

#### 4.2.3 Méthode de calcul

Le calcul du bilan hydrique édaphique (BHE) présenté ici utilise des données climatiques mensuelles, et la RUM des sols, calculés précédemment. La méthode s'inspire des travaux de Granier et al (1999) et Lebourgeois (2002).

##### 4.2.3.1 Préparation des données

Le calcul des BHE prend en compte non seulement la réserve utile mais également l'état de liaison de l'eau dans le sol à travers les notions de réserve utile facilement utilisable (RFU) et réserve utile de

survie (RUS), dont l'eau sera plus difficilement mobilisable. La RFU est égale à 60 % de la RUM, tandis que la RUS correspond aux 40 % restant.

Le calcul nécessite d'intégrer les ETP, nous utiliserons la formule de Turc intégrant le rayonnement solaire du modèle Helios. Il est également nécessaire de calculer la pluie utile, qui prend en compte l'interception du couvert végétal. Nous nous sommes basés sur les données d'Ebener pour les forêts mixtes (Ebener, 1999) avec des coefficients d'interception (en %) qui dépendent de la saison :

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
17,9	18,1	24,4	32,2	31,3	35	36	27,9	27,1	21,7	18,2	16,3

Avec pluie utile (PU, mm) = pluie du mois \* coefficient d'interception (%), la pluie du mois considéré étant fournie par le modèle AURELHY au pas kilométrique. L'évapotranspiration du sous étage et l'évaporation du sol sont également pris en compte en soustrayant 2.5% de l'ETP à la pluie utile.

#### 4.2.3.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et de la RU

Pour un mois n déterminé, on calcule la « réserve utile en eau potentielle » RUp en faisant la somme des pluies utiles du mois n (Pu) et de la réserve utile du sol à la fin du mois précédent (n-1) :

$$RUp(n) = RU(n-1) + Pu(n).$$

Afin de déterminer si l'eau du sol est facilement utilisable un coefficient k est calculé :

$$k = RUp/RUS$$

- Si  $k > 1$ , l'eau du sol est facilement utilisable, la RUM est au moins remplie à 40%. Si  $k < 1$ , il y a limitation en eau et régulation des pertes par fermeture des stomates, l'eau sera plus difficilement évaporable et un frein sera introduit dans le calcul.

La réserve utile du mois n est fonction de l'eau disponible et de l'ETR du mois précédent :

$$RU(n) = RUp(n-1) - ETR(n-1)$$

Le calcul commence au mois de janvier. Pour ce mois, on considère que la réserve utile est maximale et donc que  $RU(n-1) = RUM$ . Pour le mois de janvier, on a donc :

$$RUp(\text{janvier}) = RUM + Pu(\text{janvier}).$$

Cette somme représente l'eau disponible pour la végétation pour tout le mois.

L'ETR est estimée par rapport à l'ETP et à la quantité d'eau qui est disponible (RUp) donc évaporable. Deux cas se présentent : la réserve en eau disponible est supérieure à la réserve utile de survie ( $k > 1$ ) et alors l'eau est facilement évaporable, si elle est inférieure l'eau du sol n'est pas facilement utilisable ( $k < 1$ ).

Le calcul de l'ETR est le suivant :

- si  $k > 1$  alors deux cas se présentent :
  - si l'eau évaporable (ETP) < eau disponible (Rup) alors  $ETR = ETP$ . En conditions non limitantes, le rapport  $ETR/ETP$  n'est jamais égal à 1. Il y a toujours des résistances au transfert de l'eau dans le complexe sol-plante-atmosphère qui empêchent une équivalence totale entre ETR et ETP. Ainsi, on considère qu'en l'absence de limitation  $ETR = 0,8 \times ETP$  (Aussenac and Granier, 1979; Pontauiller et al., 1988).
  - si l'eau évaporable (ETP) est supérieure à l'eau disponible (Rup) alors l'ETR ne pourra dépasser la Rup, on a alors  $ETR = Rup$ . Il y a alors déficit d'évaporation  $DE = ETP - ETR$ . La Rup ne permet pas de reconstituer la réserve. Cette reconstitution va dépendre des conditions pluviométriques

des mois suivants. Au bout de quelques mois, la réserve en eau du sol peut devenir nulle. Le DE peut s'accroître et le déficit hydrique apparaître.

- si  $k < 1$  alors l'eau du sol n'est pas facilement utilisable. Il peut y avoir limitation en eau et régulation des pertes (fermeture des stomates). L'ETR n'est alors plus une fonction directe de l'ETP mais une fonction de la valeur du rapport  $RUp/RUS (=k)$  et de la  $RUp$  :
  - si  $k \cdot RUp > ETP$  l'ETR = ETP
  - l'ETR ne pouvant dépasser la quantité d'eau mobilisable, si  $k \cdot RUp < ETP$  alors  $ETR = k \cdot RUp$  et il y a  $DE = ETP - ETR$ .

#### **4.2.4 Production de cartes et d'indices à partir du calcul de bilan hydrique édaphique**

Le calcul du bilan hydrique édaphique se traduit par la création d'un certain nombre d'indices ayant potentiellement un effet sur la plante. Le premier indice est bien évidemment la RUM qui est la quantité d'eau maximale pouvant être contenue dans le sol. La RU de chaque mois représente l'eau disponible pour la plante à un temps  $t$ , cet indice n'ayant a priori de sens que pendant la période de végétation. Des indices plus synthétiques peuvent aussi être calculés, comme la somme des déficits d'évaporation DE sur l'année (DETOT), qui intègre la contrainte annuelle pouvant être exercée sur la plante. Dans un premier temps nous allons cartographier ces différents indices, qui seront comparés par la suite. Le calcul a été réalisé à partir de la couche des RUM et des ETPturc calculée dans le cadre de cette étude au pas de 50 mètres. Les précipitations du modèle AURELHY ont été recalculées à une résolution de 50 mètres de côté par rééchantillonnage bilinéaire afin d'avoir une résolution concordante.

On observe que les RU moyennes de janvier à avril sont stables à l'échelle de la France (88 mm), elles commencent à diminuer en mai (moyenne = 78 mm) pour atteindre 17 mm en moyenne en juillet, 5 mm en août, et 3 mm en septembre, point le plus bas. Les valeurs moyennes remontent alors doucement pour atteindre 4 mm en octobre, 30 mm en novembre et 66 mm en décembre. Les valeurs de RU et les différences entre la RUM et les RU des mois d'avril, juillet, septembre et novembre sont visibles sur les **Figures 13 et 14**. L'assèchement des sols gagne par la zone méditerranéenne mais aussi par l'ouest du pays, ce qui est clairement visible sur les cartes du mois de mai. En juillet, les sols des 2/3 sud et ouest du pays sont vidés, seules les régions de montagne, les plaines à forte RUM du nord et de l'est de France, voire localement en Bretagne, présentent des RU positives. A cette date, les plus grandes pertes de RU ne se situent plus sur les sols méditerranéens, ces sols étant en général peu profonds et sont déjà totalement vidés. En septembre, on constate un décalage de l'effet de la sécheresse, les sols des grandes plaines de l'Est se vidant à leur tour. On a donc une progression nette de l'ouest vers l'est de la France de l'assèchement des sols. On constate qu'à cette date seules les montagnes les plus humides demeurent avec une RU positive (Alpes du nord, localement Jura, Vosges, Massif central et Pyrénées), ainsi que quelques régions de plaine (Pas de Calais, Argonne, plaine de Saône, voire Bassin Aquitain). Les sols se rechargent ensuite en eau, les zones les plus rapidement rechargées étant celles de plus faible RU et notamment les montagnes et le grand sud est de la France (bassin Méditerranéen, Massif central, Provence, vallée de Rhône, Alpes du nord, Jura). A cette date, les sols à plus faible RU se situent en Alsace, dans l'ouest du Bassin Parisien, en Limagne, ou dans le Bassin Aquitain. Même avec une RUM relativement faible, on constate que les sols du pourtour Méditerranéen se rechargent assez rapidement en fin de saison. En décembre, les RUM ne sont pas partout reconstituées. On touche ici une des limites de ce travail au pas de temps mensuel sur des valeurs normales. L'hypothèse  $RU \text{ janvier} = RUM$  n'est pas partout exacte, et en fait les sols finissent probablement de se recharger en janvier voire février. Cependant, l'impact sur la végétation de cette approximation est certainement faible, celle-ci étant au repos à cette date. On constate également que le frein linéaire utilisé lorsqu'on atteint la RUS n'est pas forcément très judicieux, l'eau étant plus difficile à évaporer lorsque la RUS est quasiment vide que lorsqu'elle est quasiment pleine. Des travaux ultérieurs sont donc à mener afin d'essayer d'améliorer la méthode de calcul.

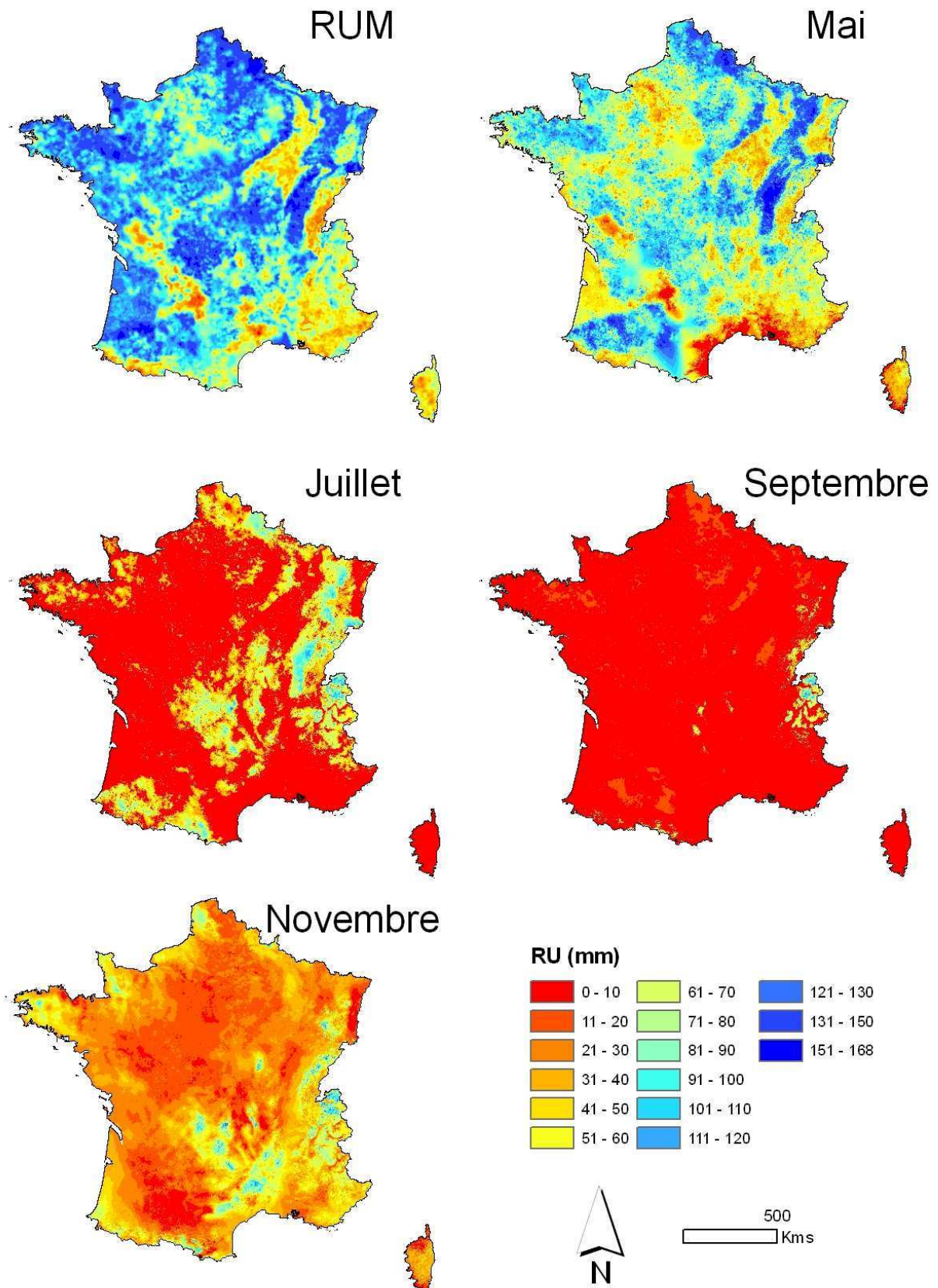


Figure 13. Evolution de la réserve utile au cours de l'année (Valeurs moyennes sur la période 1960-1990).



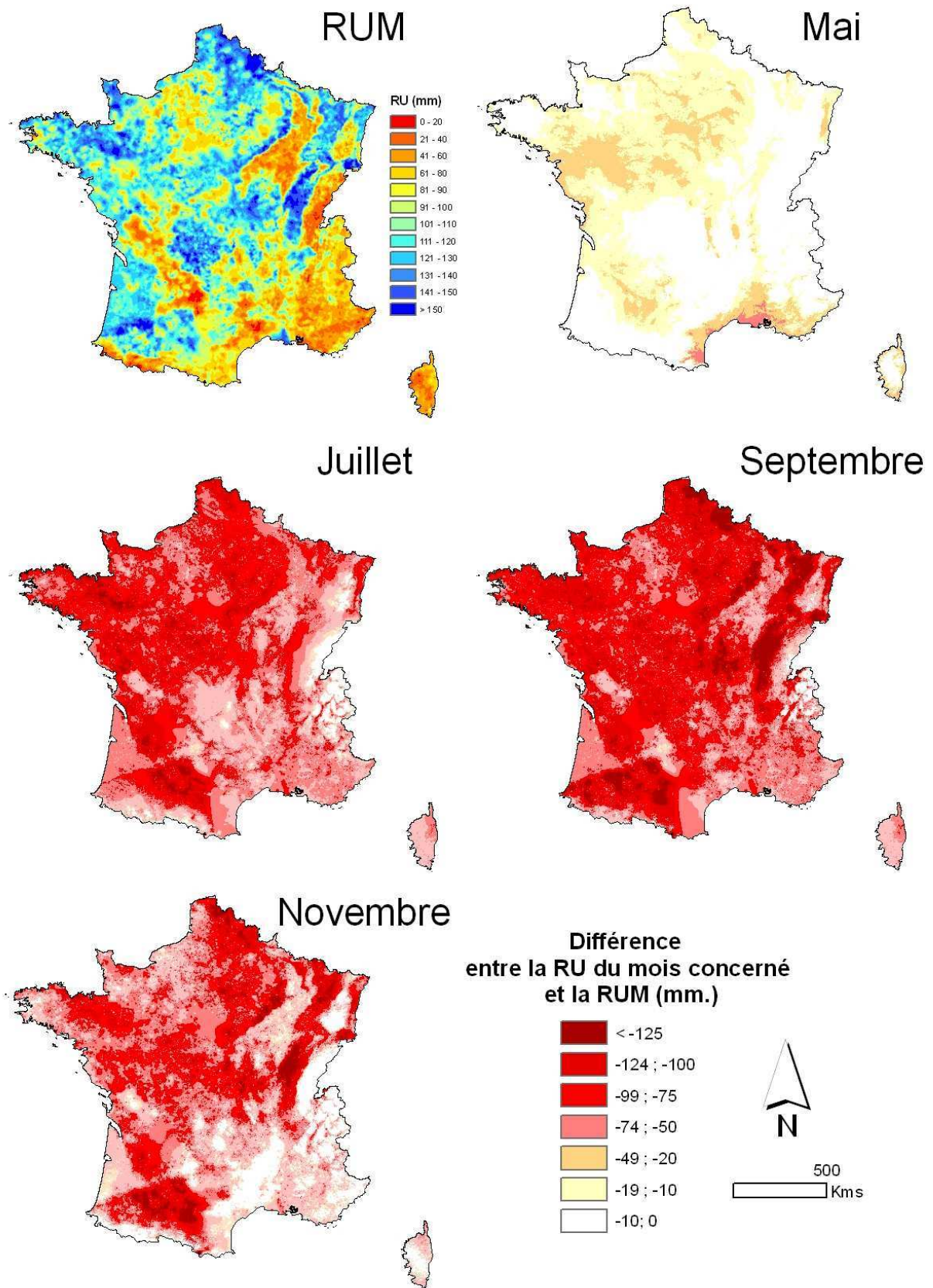


Figure 14. Différence entre la RU et la RUM pour différentes périodes de l'année

## **4.2.5 Conclusion quant au calcul des indices bioclimatiques**

La création d'indices spatialisés représente une avancée significative par rapport à l'utilisation des données des postes météorologiques les plus proches, telle qu'elle était pratiquée auparavant. Cette méthode avait deux inconvénients majeurs pour le forestier : la qualité de la donnée était fonction de la distance au poste météo et l'effet de la topographie n'était pas pris en compte. La donnée climatique variant dans l'espace, celle-ci ne pouvait être cohérente sur le site étudié que si le poste météo était très proche. Dans le cas contraire, il aurait fallu interpoler les mesures de l'ensemble des postes les plus proches en fonction de la distance, afin de prendre en compte la variabilité spatiale. D'autre part, l'effet de la topographie n'était pas pris en compte, les postes météo étant souvent situés en zone plane. De plus, le relief est souvent très variable à l'échelle d'une forêt, et aucune donnée ne permettait d'estimer sa diversité, alors que l'importance de la topographie est souvent reconnue dans les typologies de stations. L'existence de données spatialisées sous SIG résout une grande partie de ces problèmes.

De nombreuses variables SIG, qui n'existaient pas sur le territoire français ont été créées. Un effort particulier a été porté sur les variables de bilan hydrique, dont le calcul a été réalisé selon différentes méthodes. Le calcul du rayonnement solaire à l'échelle du territoire est un point novateur qui a son importance, car il est un bon indicateur de la topographie à l'échelle locale. Or, les variables du modèle Aurelhy de Météo France ne prennent pas en compte une variabilité aussi fine. La cartographie du rayonnement solaire, des ETP Turc et des bilans hydriques correspondant, à la résolution de 50 mètres de côté sur un territoire grand comme la France, permet de fournir mois par mois une immense base d'informations géoréférencées, contenant 220 millions d'informations par couche. Par exemple, le seul calcul de ces trois variables pour 12 mois de l'année et la valeur annuelle correspond à plus de 8 milliards d'informations. Un autre point important réside dans le calcul et la spatialisation des RUM sur la France, et leur prise en compte dans le calcul du bilan hydrique. Un gros travail d'analyse, d'interprétation, d'amélioration est à réaliser sur ces variables. Une comparaison visuelle entre la distribution spatiale des bilans hydriques climatiques et des bilans hydriques édaphiques montre une faible corrélation spatiale entre ces deux données. Enfin, la notion de résolution a été discutée en ce qui concerne le calcul des RUM, montrant à travers le calcul d'une variable l'intérêt d'un travail à fine résolution et son effet sur la qualité de la variable.

L'étude des relations existant entre ces variables et de l'intérêt écologique de chacune d'entre elles reste à réaliser, particulièrement en ce qui concerne les bilans hydriques édaphiques qui d'habitude n'étaient calculées que très ponctuellement sur le territoire, et dont aucune représentation spatiale aussi détaillée n'existe. D'autre part, pour une même variable, différentes sources de données ou méthodes de calcul sont disponibles. C'est le cas par exemple pour le calcul du rayonnement solaire, ou des ETP, dont la cartographie montre de sensibles différences selon la méthode d'estimation employée. Une comparaison de ces données devra être réalisée, afin d'essayer de déterminer lesquelles sont les plus pertinentes, les plus proches des valeurs de référence mesurées sur le terrain, et les plus aptes à prédire la distribution ou la productivité de la végétation, en fonction de la résolution considérée.

## **5 Validité des indices**

### **5.1 Comparaison et validation des indices de rayonnement solaire et de bilans hydriques climatiques**

Quatre étapes vont être abordées, dans un premier temps, nous allons comparer les indices calculés sous SIG à des données mesurées sur des postes météo. Cette étape permet de comparer les différentes méthodes de calcul afin de déterminer s'il est possible d'établir une hiérarchie entre elles.

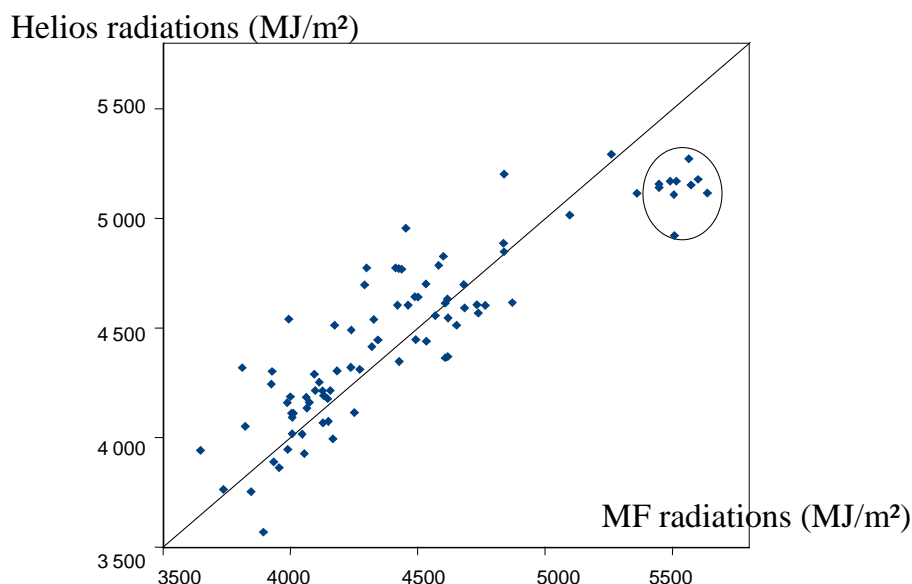
Nous aborderons ensuite la notion de complexité des indices, en cherchant à savoir si un indice simplement calculé ne constitue pas un bon palliatif à des calculs complexes. Finalement nous nous intéresserons à la capacité prédictive de ces indices, c'est-à-dire leur capacité à prédire la distribution ou la fertilité de la végétation.

### 5.1.1 Validation et comparaison des calculs de rayonnement solaire

#### 5.1.1.1 Validation du modèle Helios (réalisé par l'ENGREF, point 5.3.1. de la convention)

Le modèle Helios est validé en comparant les données de rayonnement estimées à celles mesurées sur les postes de Météo France. Pour cela, nous avons acquis les données décennales de 88 postes climatiques possédant des séries d'enregistrement suffisamment longues. Nous n'avons ainsi conservé que les stations qui au moins 5 années d'enregistrement pour chacune des décades concernées par la période 1971-2002. Nous avons également repositionnés les coordonnées géographiques de chacun de ces postes à l'aide des cartes IGN, les coordonnées fournies par Météo France étant souvent imprécises et pour certains postes fausses. Les données décennales ont ensuite été agrégées par mois afin de pouvoir les comparer aux données mensuelles du modèle Helios.

La validation montre une forte corrélation entre Helios et Météo France ( $R^2 = 0,78$  sur les valeurs annuelles), avec un biais annuel inférieur à 1% (36,9 MJ/m<sup>2</sup>) et une erreur moyenne absolue de 194,5 MJ/m<sup>2</sup> (pour une valeur moyenne de 4450 MJ/m<sup>2</sup>) (**Figure 15**). Le modèle Hélios surestime légèrement le rayonnement en été et le sous-estime en hiver. Les mois les mieux corrélés avec les postes Météo-France sont ceux de décembre et janvier ( $R^2 = 0,88$ ) ; le moins bon étant celui de mai ( $R^2 = 0,60$ ) (**Tableau 9**).



**Figure 15.** Comparaison des valeurs de rayonnement annuelles calculées avec Hélios et les mesures de Météo France (MF) (MJ/m<sup>2</sup>) (moyenne 1961-1990 ; 88 postes)

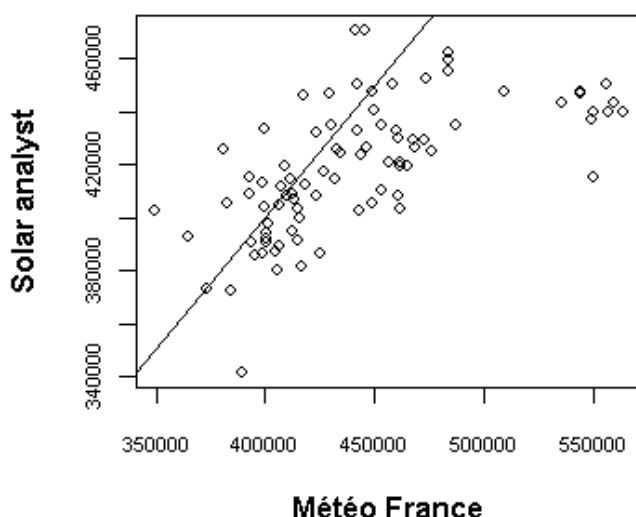
	Janv.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct	Nov.	Dec.	Annee
MF	128.	190.	350.	454.	582.	619.	648.	571.	397.	253.	147.	105.	4450.
	7	9	1	8	6	3	5	6	4	9	0	4	2
Hélios	111.	174.	336.	467.	606.	661.	681.	580.	401.	239.	128.	91.5	4481.
s	7	0	9	6	0	2	5	5	7	8	9		2
biais	-17.0	-16,9	-13.2	12.8	23.4	41.9	33	8.9	4.3	-14.1	-18.1	-13.9	30.9
R <sup>2</sup>	0.88	0.84	0.81	0.60	0.60	0.62	0.68	0.65	0.72	0.78	0.84	0.88	0.78

**Tableau 9.** Corrélations entre les valeurs moyennes mensuelles calculées avec Hélios et les mesures de Météo France (MF) (MJ/m<sup>2</sup>) (moyenne 1961-1990 ; 88 postes).

**5.1.1.2 Validation du calcul réalisé avec Solar analyst** (réalisé par l'IFN, en partenariat l'ENGREF pour la validation du modèle à l'aide de son jeu de données, point 5.3.1 de la convention)

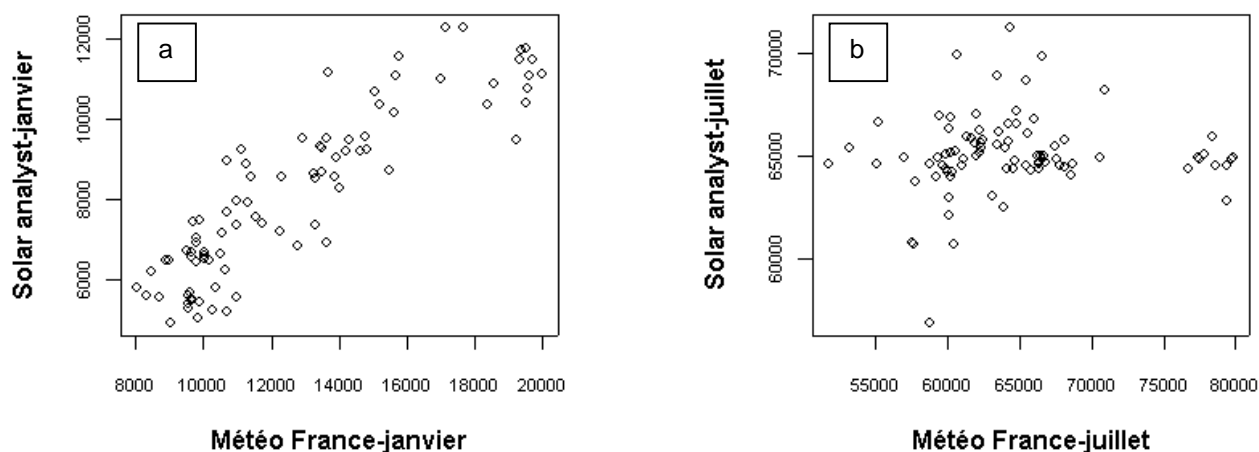
Pour valider Solar Analyst, nous disposons des mesures de rayonnement solaire de 86 stations Météo France utilisées pour la validation d'Hélios (voir paragraphe précédent). Nous avons donc calculé avec Solar analyst la radiation reçue au niveau de ces stations et nous l'avons comparée aux valeurs mesurées (**Figure 16**).

Il existe une relation linéaire entre les valeurs de radiation annuelle calculées par Solar Analyst et celles mesurées par Météo France mais le coefficient de détermination est assez faible bien qu'étant significatif ( $R^2 = 0,39$ ). Globalement, Solar Analyst sous-estime le rayonnement par rapport aux données de Météo-France.



**Figure 16.** Radiations globales annuelles (en milliers de J par m<sup>2</sup>) calculées par Solar Analyst et mesurées par Météo France au niveau des 86 stations. La droite représente la première bissectrice.

En hiver, les valeurs calculées par Solar Analyst sont mieux corrélées aux valeurs mesurées mais restent nettement plus faibles (**Figure 17a**,  $R^2 = 0,78$ ). En été il n'y a pas de relation entre valeurs calculées et valeurs mesurées (**Figure 17b**).



**Figure 17** : Rayonnement global (en milliers de J par m<sup>2</sup>) des mois de janvier (a) et juillet (b) calculé par Solar Analyst et mesuré par Météo France sur 86 stations.

La validation de Solar Analyst est limitée par le faible nombre de stations météorologiques disponibles et le fait qu'elles sont situées majoritairement sur terrains plats. Ainsi, seulement six stations ont une pente supérieure à 10° et douze une pente supérieure à 5°, d'où le problème pour une validation en montagne. Un deuxième problème est la faible résolution du MNT (50x50m) qui lisse les variations topographiques en zone montagneuse.

### 5.1.1.3 Comparaison de Solar analyst, Helios et SATMOS (réalisé par l'IFN, point 5.3.1 de la convention)

#### 5.1.1.3.1 Validation à l'aide des postes Météo France

Afin de comparer simultanément les estimations de Solar analyst, Helios et Satmos aux valeurs de Météo France, l'analyse a été restreinte aux 31 postes météo couvrant la période de calcul de Satmos. Cela explique par exemple que les résultats concernant Helios soient un peu différents de ceux présentés par l'ENGREF, dont le jeu de validation comprenait 88 postes. Pour chaque cas et pour les 12 mois de l'année, la relation linéaire entre les 31 valeurs de radiation globale calculées et les valeurs mesurées par Météo France a été analysée (**Tableau 10**). D'une manière générale, les valeurs calculées sont moins bien corrélées aux données de Météo France pour les périodes printanière et estivale (d'avril ou mai selon les modèles à août). Les meilleures relations sont obtenues avec Satmos mais les valeurs de Satmos sont toujours supérieures à celles de Météo France, surtout entre mars et juillet. Les moins bonnes corrélations sont obtenues avec Solar Analyst.

	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.	Année
Solar An.	0,76	0,60	0,46	0,15	ns	ns	ns	0,15	0,38	0,45	0,59	0,76	0,32
Hélios	0,90	0,85	0,82	0,62	0,55	0,56	0,67	0,59	0,67	0,78	0,89	0,91	0,76
Satmos	0,92	0,92	0,93	0,91	0,84	0,84	0,88	0,82	0,87	0,86	0,92	0,92	0,93

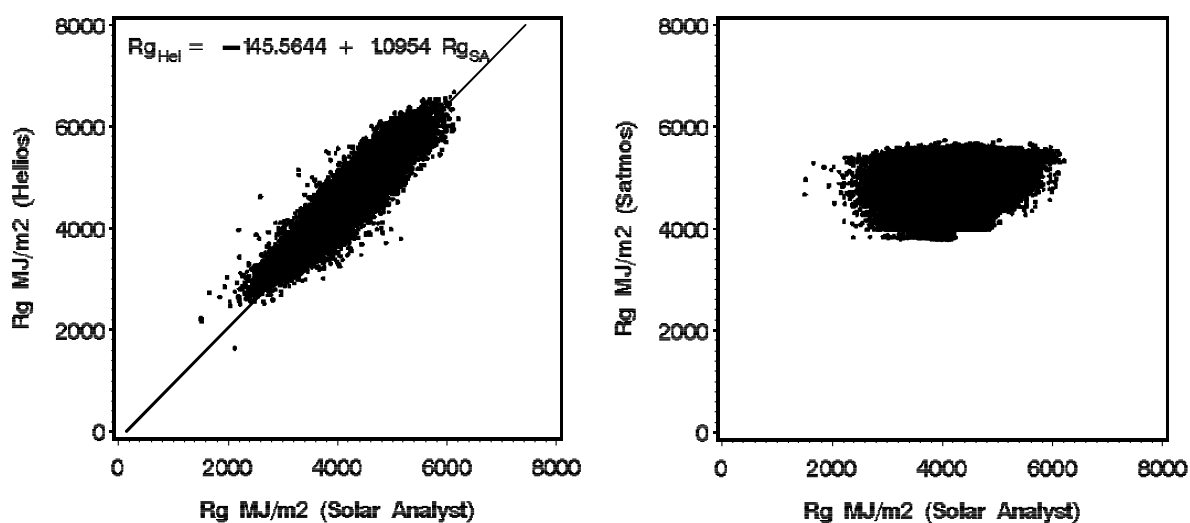
**Tableau 10.** Coefficients de détermination ( $R^2$ ) des régressions linéaires entre les valeurs de radiation globale mensuelle et annuelle estimées et celles mesurées par Météo France au niveau de 31 stations. ns = non-significatif.

### 5.1.1.3.2 Comparaison de Solar analyst, Helios et SATMOS sur les points IFN

Les comparaisons France entière entre Solar Analyst, Hélios et Satmos ont été réalisées sur les 98 148 points du dernier inventaire de l'IFN (période 1988-2004, ancienne méthode). Pour Solar Analyst, les valeurs de rayonnement ont été calculées selon le mode point. Pour Helios et Satmos, les valeurs de rayonnement ont été obtenues par croisement avec les couvertures (grid) de rayonnement annuel fournies respectivement par le Lerfob et l'Inra.

Il existe une relation linéaire entre les valeurs du rayonnement global annuel calculées par Solar Analyst et celles issues d'Hélios (**Figure 18a**). Cette relation est beaucoup moins nette avec les valeurs de Satmos (**Figure 18b**). D'une manière générale, les valeurs de Solar Analyst sont inférieures à celles des deux autres modèles. La spatialisation des écarts entre les valeurs de ces différents modèles montre que les différences avec Satmos sont plus marquées dans les zones montagneuses. La couverture de radiation solaire fournie par Satmos est calculée à un pas de 3 km, ce qui peut expliquer une plus faible précision pour les zones montagneuses (effet de lissage des variations dues à la topographie). D'autre part la topographie n'est pas directement prise en compte dans les calculs de Satmos.

Dans un second temps, les comparaisons ont donc été effectuées pour les zones de plaine uniquement (pente  $\leq 2^\circ$  et altitude  $\leq 300\text{m}$ ). La relation s'améliore avec cependant des différences plus importantes dans le sud de la vallée du Rhône et le pourtour méditerranéen où Solar Analyst donnent les valeurs les plus faibles et Satmos les valeurs les plus fortes.



a) b)  
**Figure 18.** Relation entre la radiation globale annuelle issue de Solar Analyst et a) celle de Hélios, b) de Satmos

Les relations entre les modèles sont également améliorées lorsque l'on restreint la comparaison à la période de végétation (**Tableau 11**).

	Solar Analyst			SATMOS*			HELIOS*		
	A*	PV*	PV+P***	A*	PV**	PV+P***	A*	PV**	PV+P***
Solar Analyst				26	54	76	53	73	93
SATMOS							53	67	98
HELIOS									

A\* - radiation globale annuelle ;  
 PV\*\* - radiation globale pour la période de végétation (avril-octobre) ;  
 PV+P\*\*\* - radiation globale pour la période de végétation (avril-octobre) et condition en plaine (pente<=2°; altitude <=300m);

**Tableau 11.** Pourcentage de points dont l'écart entre les valeurs de radiation est compris entre - 5 et + 5 %.

Les calculs de Solar Analyst et Hélios sont basés sur le MNT de la France au pas de 50 m, tandis que le modèle fourni par Satmos est calculé au pas de 3 km. Ceci peut expliquer pourquoi une partie des plus grands écarts entre les valeurs de rayonnement solaires sont observées dans les régions de montagne. La zone méditerranéenne est également caractérisée par des écarts importants entre Solar Analyst et les deux autres modèles qui donnent des valeurs supérieures.

La nébulosité n'est pas prise en compte dans les calculs de Solar analyst alors qu'elle l'est dans les modèles Hélios et Satmos. Cependant Solar Analyst donnent les valeurs les plus faibles des 3 modèles.

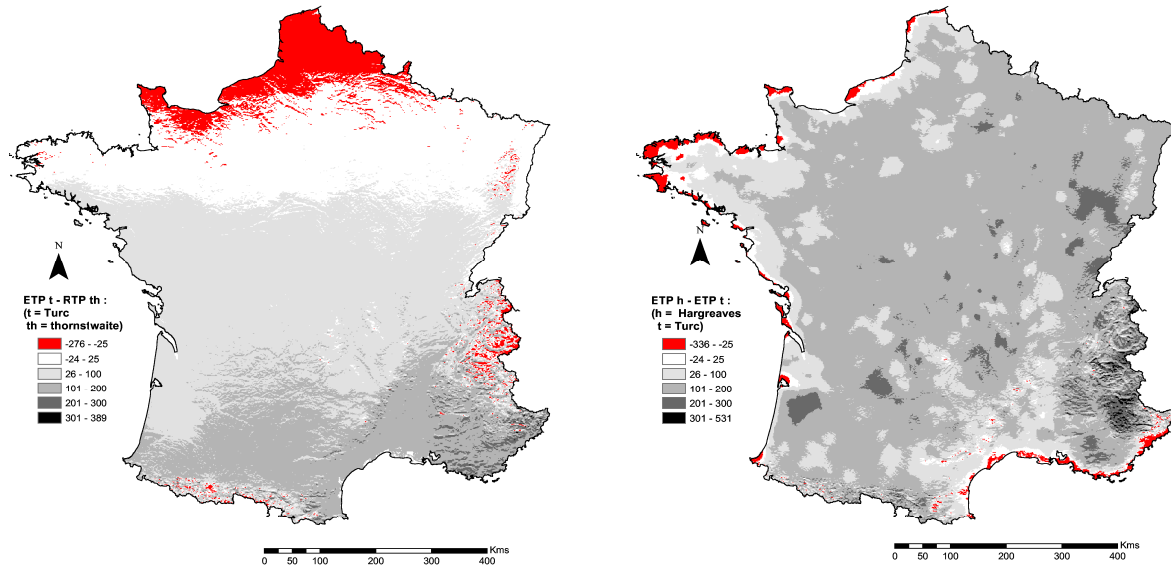
## **5.1.2 Validation et comparaison des calculs de bilans hydriques à l'aide de données mesurées** (réalisé par l'ENGREF, point 5.3.1 de la convention)

### **5.1.2.1 Comparaison des mesures d'ETP**

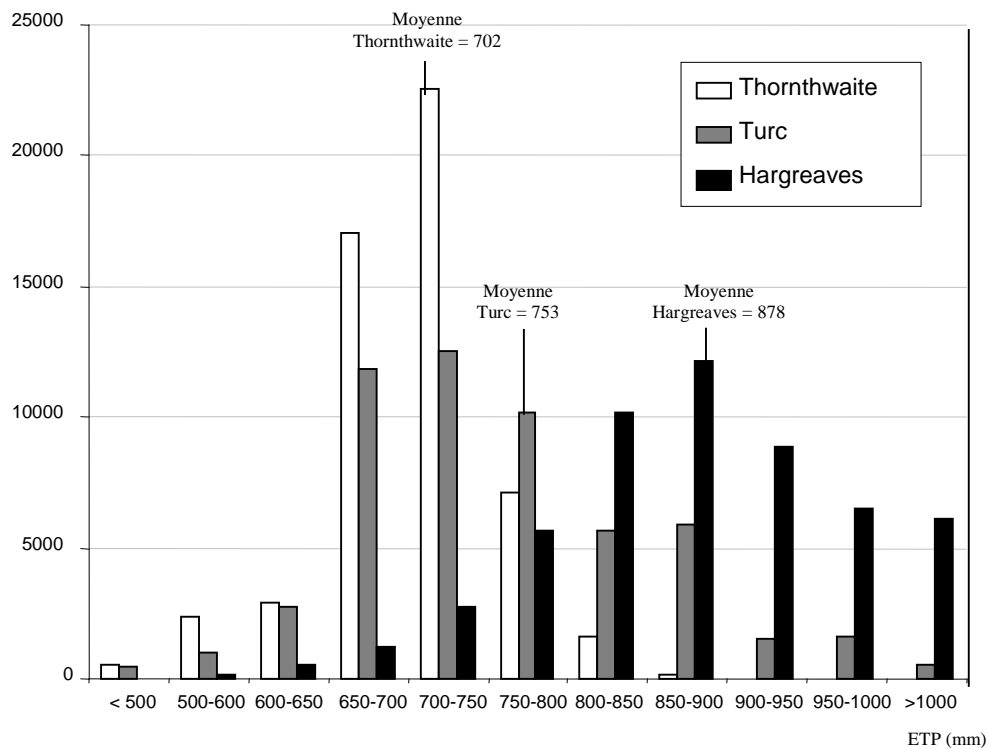
De nombreuses études ont comparées les méthodes de calculs de l'ETP (Choisnel *et al.*, 1992 ; Winter *et al.*, 1995 ; Federer *et al.*, 1996 ; Jensen *et al.*, 1997 ; Droogers et Allen, 2002 ; Rosenberry *et al.*, 2004). Dans ces travaux, la valeur de référence est soit celle d'un couvert herbacé en croissance et bien alimenté en eau suivi sur plusieurs années en case lysimétrique de quelques dizaines de m<sup>2</sup>, ou celle donnée par la formule de Penman-Monteih qui est reconnue comme la meilleure formule dans une large gamme de contexte climatique. Les estimations par les différentes formules sont alors comparées aux mesures réelles ou de Penman et les résultats sont discutés en terme d'écart moyen journalier. En Europe, l'étude la plus complète est celle de Choisnel *et al.* publiée en 1992. Ces auteurs ont comparé les estimations de 9 formules à partir de données climatiques de 33 stations réparties dans 7 pays. L'analyse s'est faite par décennie sur des périodes d'analyse de 10 à 40 ans. D'une façon générale, plus l'échelle temporelle prise en compte est petite (jour ou quelques jours), et plus les écarts entre les différentes estimations sont importants. Les formules intégrant les nombreux paramètres climatiques journaliers comme la vitesse du vent, l'humidité de l'air, etc. sont évidemment les plus précises. Les formules fondées essentiellement sur la température sous-estiment l'ETP notamment en été. Ceci s'explique en partie par le fait que, au niveau du cycle annuel, les variations de température ont environ un mois de retard sur celles du rayonnement solaire (Choisnel *et al.*, 1992).

La comparaison des ETP moyennes (période 1961-1990) calculées sous SIG au niveau de la France entière et au pas kilométrique met clairement en évidence des différences importantes (**Figure 19**). L'ETP Thornthwaite donne les valeurs annuelles les plus faibles (moyenne : 702 mm), devant Turc (753 mm) et Hargreaves (878 mm.) (**Figure 20**). L'amplitude des valeurs est plus forte avec les formules de Hargreaves et Turc ; la formule de Thornthwaite ayant tendance à uniformiser les ETP. Par rapport à Turc, Thornthwaite surestime les valeurs sur 20% du territoire (nord de la France) ; dans 1% des cas, les écarts annuels sont de plus de +100 mm (**Figure 20**). Elle les sous-estime sur près de 65% du territoire, présentant des écarts supérieurs à 100 mm dans 20% des cas. Cette sous-estimation apparaît nettement en zone méditerranéenne. Cette comparaison illustre la meilleure prise en compte des changements de latitude et de topographie par la formule de Turc, grâce au couplage température-rayonnement à travers l'utilisation du rayonnement solaire calculé par le modèle Helios. Ainsi, les écarts entre ces deux méthodes de calcul peuvent atteindre plus de 200 mm (voire localement 300 mm) sur les versants sud des massifs situés dans le bassin méditerranéen. Concernant la comparaison Turc-Hargreaves, on observe que, excepté pour les zones littorales (1,5 % du territoire), les valeurs de Hargreaves sont supérieures à celles de Turc. 73 % du territoire présentent un écart supérieur à 100 mm et 5% un écart supérieur à 200 mm (**Figure 20**). Ces différences sont principalement liées à la prise en compte des amplitudes thermiques dans la formule. Les écarts entre les deux formules sont également beaucoup plus importants dans les versants nord (plus de 300 mm.) que dans les versants sud ; la formule d'Hargreaves ne prenant pas en compte l'effet de la topographie, ce qui est bien visible dans les Alpes, par exemple.





**Figure 19.** Ecarts annuels moyens en mm (période 1961-1990) entre les ETP Turc et Thornthwaite (carte de gauche) et les ETP Hargreaves et Turc (carte de droite). Les données ont été calculées au pas kilométrique. Les rayonnements solaires utilisés pour le calcul de Turc ont été estimés avec le modèle Helios.

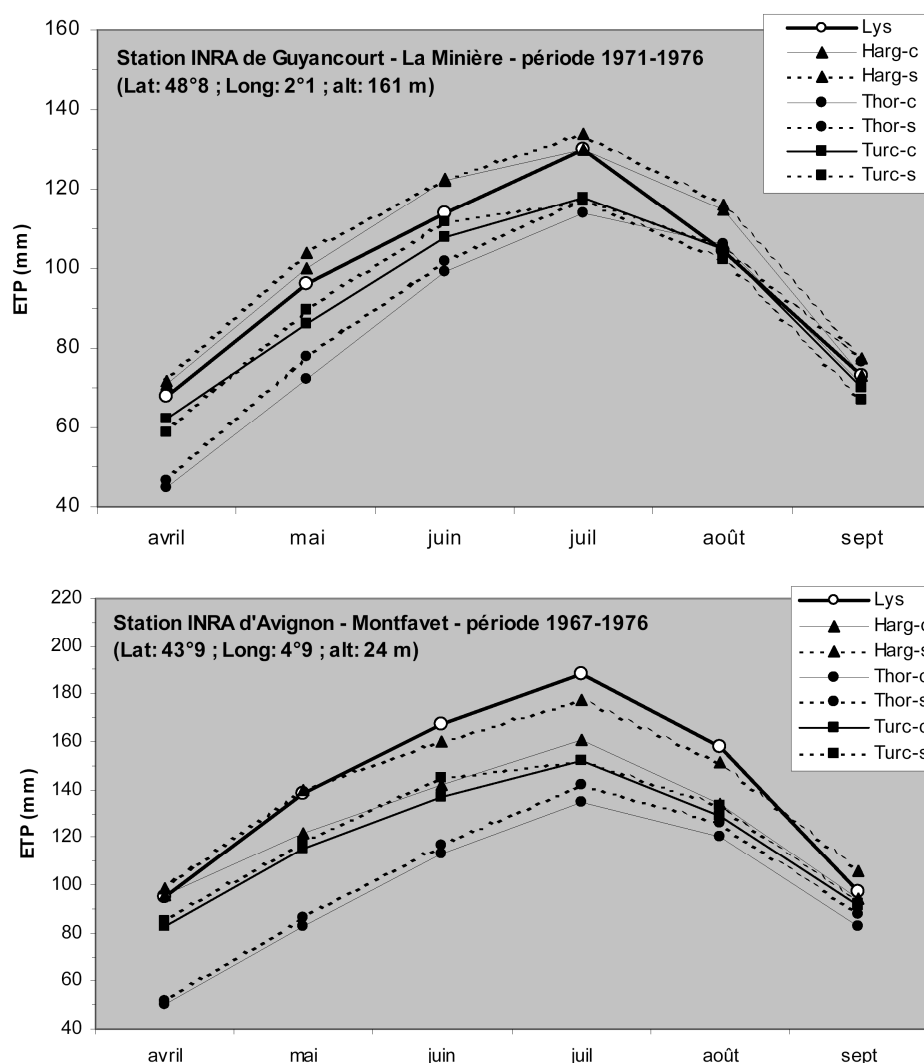


**Figure 20.** Histogramme de répartition des valeurs des différentes ETP calculées sous SIG au niveau de la France entière (données au pas kilométrique).

### 5.1.2.2 Validation à l'aide de postes météorologiques

L'ENGREF a comparé les ETP calculées selon les différentes méthodes (Turc, Hargreaves, et Thornthwaite) à des mesures réalisées sur cases lysimétriques. Cette validation est difficile car peu de postes fournissant cette mesure, les stations INRA de Guyancourt (lat 48.8°, long 2.1°) et d'Avignon (lat 43.9°, long 4.9°; données issues de Choissnel *et al.*, 1992) en faisant partie. Nous avons comparé les mesures de terrain avec les calculs basés sur les relevés météo de ces mêmes postes (suffixe -c) et les calculs réalisées sous SIG (suffixe -s) (**Figure 21**). La méthode de calcul de Hargreaves donne les meilleurs résultats, l'écart absolu moyen avec les données calculées d'après le poste météo pendant la période avril-septembre étant la plus faible (4,3 mm pour le poste de Guyancourt, 16 mm pour celui d'Avignon). Les moins bons résultats sont donnés par la formule de Thornthwaite. Les écarts sont respectivement de 13,7 mm pour Guyancourt et 43,2 mm pour Avignon. Il est à noter que les valeurs calculées sous SIG ne sont pas identiques à celles calculées avec les mesures du poste météo du fait de l'utilisation de données modélisées et d'une période de référence différente (moyenne 1961-1990 pour les données SIG). Cependant, les écarts sont faibles et les tendances sont respectées, les calculs sous SIG ayant tendance à être plus élevés.

Si les calculs effectués avec la formule d'Hargreaves semblent donner de meilleurs résultats en plaine, on peut supposer que ce n'est plus le cas en zone de montagne du fait de la non prise en compte de la topographie. On peut ainsi supposer que la formule de Turc donne de meilleurs résultats en zone de relief. Cependant, une analyse spécifique avec des mesures en milieu de montagne devrait être mise en œuvre pour le confirmer. De même, cette analyse reste à approfondir avec un nombre plus important de mesures réalisées dans des conditions variées.



**Figure 20.** Comparaison entre ETP mesurées à partir des cases lysimétriques (Lys d'après Choisnel et al. 1992) et calculées avec les données issues des stations météorologiques (c) ou des calculs sous SIG (s). Harg : ETP calculée avec la formule de Hargreaves ; Thor : Thornthwaite ; Turc : Turc. Pour les calculs sous SIG ce sont les moyennes trentenaires 1961-1990 qui ont été utilisées.

### 5.1.3 Capacité prédictive du rayonnement solaire et des bilans hydriques climatiques (réalisé par l'ENGREF)

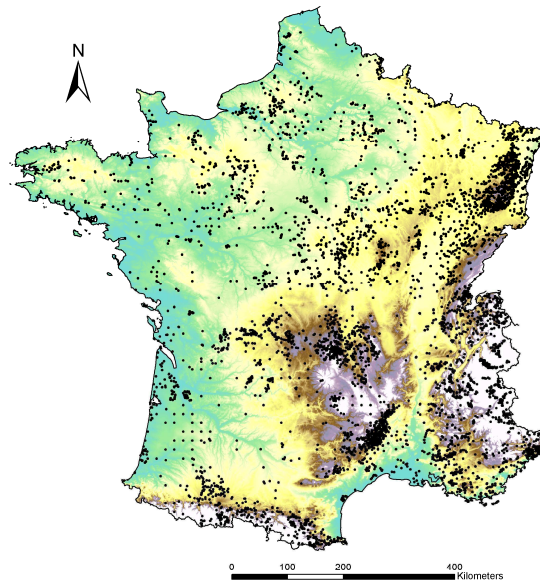
#### 5.1.3.1 Méthode

S'il est important de valider les indices bioclimatiques spatialisés à l'aide de relevés de terrain, il est également utile d'évaluer l'intérêt de ces indices dans le cadre d'études stationnelles. Cela revient à évaluer la capacité prédictive des indices vis-à-vis de la distribution ou de la fertilité des espèces, deux paramètres majeurs permettant la discrimination des stations forestières.

Dans un premier temps, une méthode statistique classique, la régression logistique multiple (McCullagh and Nelder, 1997), a été utilisée pour modéliser la distribution de quelques espèces, dans le but d'estimer si le rayonnement solaire calculé avec le modèle Helios ou les bilans hydriques pouvaient améliorer les modèles à l'échelle de la France. Trois espèces forestières ont été sélectionnées car leur sensibilité à la lumière était connue : *Abies alba*, *Acer pseudoplatanus*, et

*Quercus pubescens*. *Abies alba* (sapin blanc) est un conifère de 35 à 45 mètres de hauteur, commun dans les massifs montagneux de France, *Acer pseudoplatanus* (Erable sycomore) est un arbre à feuilles caduques de 20-30 m, dont la distribution est centrée sur l'Europe centrale et que l'on trouve principalement dans l'est de la France. Ces deux espèces sont connues pour aimer une humidité atmosphérique importante {Rameau, 1993 #465}. *Quercus pubescens* (Chêne pubescent) est un arbre de 10 à 25 m héliophile et thermophile, présent dans les 2/3 sud de la France.

Les données concernant la présence ou l'absence de ces trois espèces ont été extraites des bases de données EcoPlant {Gégout, 2005 #7121} et Sophy {Brise, 1995 #8170} qui collectent des relevés phytocologiques complets sur l'ensemble de la France. La position des relevés est connue avec une précision variant entre 10 et 1000 m.. Pour cette analyse, nous avons échantillonné un jeu de placettes stratifiées selon la latitude (3 strates: 41-48°, 45-47.5 °, 47.5-51°), le couplage pente/exposition (3 strates: pente de moins de 5°, pente de plus de 5° sur versant nord, pente de plus de 5° sur versant sud). Le jeu de données contient ainsi 6219 relevés, répartis en 9 strates qui contiennent entre 514 et 750 relevés (**Figure 21**). Les relevés trop proches les uns des autres ont été éliminés dans le but d'éviter des problèmes d'autocorrélation spatiale.



**Figure 21.** Localisation des 6219 relevés utilisés pour modéliser la distribution des plantes.

Pour chacune des trois espèces, nous avons évalué la capacité prédictive des rayonnements solaires calculés avec Helios et des bilans hydriques calculés selon différentes méthodes. Nous avons comparé les modèles de distribution réalisés sans ces variables, à ceux intégrant le rayonnement calculé avec le modèle Helios, ou les bilans hydriques calculés selon les méthodes de Turc, Hargreave, ou Thornthwaite.

Dans un premier temps, nous avons modélisé la distribution des trois espèces selon 4 variables écologiques classiquement utilisées pour caractériser la distribution des espèces {Franklin, 1995 #7591; Moser, 2005 #8076; Thuiller, 2003 #6631; Pinto, 2005 #12902}: les températures annuelles moyennes (MaT), les précipitations annuelles moyennes (MaP), l'altitude, et le pH des sols. Ces

variables ont été extraites de 4 couches de données SIG : le modèle Aurelhy à une résolution de 1 km<sup>2</sup> pour MaT et MaP {Benichou, 1987 #41}, pour l'altitude le MNT de l'IGN à une résolution de 50 m. a été utilisé, et le pH a été extrait d'une carte élaborée en partenariat entre l'ENGREF et l'IFN, et utilisant les valeurs indicatrices des espèces élaborées par JC Gégout et déjà utilisées avec succès pour prédire la distribution de *Acer campestre* et *Vaccinium myrtillus* (Coudun and Gégout, 2005; Coudun et al., 2006). La corrélation entre le rayonnement solaire et ces variables est faible : le R<sup>2</sup> varie de 0.00094 pour MaP à 0.066 pour le pH.

Nous avons utilisé la technique de régression logistique multiple pour élaborer les modèles avec une méthode pas à pas ascendante permettant de sélectionner les variables les plus adéquates une par une. L'ajustement du modèle est caractérisé par une mesure de la réduction de la variance estimée par la méthode du maximum de vraisemblance. La mesure de la réduction de déviance se fait à travers le D<sup>2</sup> :

$$D^2 = \frac{dev_{null} - dev_{resid}}{dev_{null}}$$

Avec Devnull = déviance nulle et déviance resid = déviance résiduelle (déviance restant inexpliquée après l'ajout des prédicteurs)

A chaque étape nous sélectionnons la variable qui a le D<sup>2</sup> le plus important (Coudun et al., 2006), chaque variable étant testée sous sa forme quadratique, ou, si elle n'est pas significative, avec son terme simple (p-value < 0.001). La procédure est stoppée quand l'ajout d'une nouvelle variable n'induit pas d'augmentation significative de la déviance expliquée ou quand les variables candidates ne sont pas significatives (p < 0.001). La qualité globale du modèle est caractérisée par son sa déviance expliquée (D<sup>2</sup>).

Un premier modèle a été réalisé pour chaque essence à l'aide des 4 variables candidates décrites précédemment. Ensuite nous avons réalisé une deuxième série de modèles en ajoutant aux 4 variables candidates une variable supplémentaire, successivement le rayonnement solaire calculé avec le modèle Helios, et le bilan hydrique, calculé selon la formule de Thornthwaite (WBth), puis la formule de Turc (Wbtu) et la formule de Hargreaves (Wbha), calculés selon la méthode définie lors des chapitres précédents. Nous avons choisi de prendre la valeur du mois de Juin car c'est un mois important pour la physiologie de la plante.

### **5.1.3.2 Résultats**

La réalisation de modèles de distribution met en évidence un effet significatif (p> 0.001) du rayonnement solaire calculé avec Helios pour les trois espèces étudiées. Le D<sup>2</sup> pour des modèles univariés ne prenant qu'en compte le rayonnement solaire, atteint respectivement 0.043, 0.018 et 0.100 pour *Acer pseudoplatanus*, *Abies alba*, et *Quercus pubescens* (**Tableau 12**).

<i>Espèces</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Quercus pubescens</i>
occurrences	819	1172	905
rad6	0,043	0,018	0,100
pH, MaT, MaP, DEM	0,184	0,332	0,328
pH, MaT, MaP, DEM + rad6	0,217	0,352	0,343
pH, MaT, MaP, DEM + WBha6	0,210	0,344	0,338
pH, MaT, MaP, DEM + WBth6	0,197	0,347	0,337
pH, MaT, MaP, DEMt + Wbtu6	0,235	0,364	0,358

**Tableau 12.** Nombre d'occurrences d' *Acer pseudoplatanus*, *Abies alba*, et *Quercus pubescens* (n = 6219), et déviance expliquée (D<sup>2</sup>) pour les modèles de distribution. Le rayonnement solaire de juin calculé avec le modèle Helios (rad6), le pH, les températures moyennes annuelles (MaT), les précipitations moyennes annuelles (MaP), l'altitude (Alt), et les bilans hydriques du mois de Juin calculé selon les méthodes de Thornthwaite, Turc et Hargreaves (WBth6, WBtu6, Wbha6) sont utilisés en fonction des modèles.

Les températures et les précipitations sont les variables les plus importantes pour prédire la distribution de *Acer pseudoplatanus* et *Abies alba*, et le pH est la variable la plus importante pour prédire la distribution de *Quercus pubescens*. Le rayonnement solaire intervient de façon significative quand il est inclus dans le modèle, pour chacune des 3 essences testées (**Tableau 12 et Figure 22**). La réponse d' *Acer pseudoplatanus* et d' *Abies alba* au rayonnement solaire est décroissante, et la réponse de *Quercus pubescens* est croissante, corroborant les connaissances empiriques sur ces espèces {Rameau, 1993 #465}. Le rayonnement solaire agit en complément des autres variables climatiques ou édaphiques pour expliquer la distribution de ces trois espèces. L'effet du bilan hydrique calculé en utilisant les formules de Thornthwaite et Hargreaves est significatif pour chacune des espèces mais il est systématiquement inférieur à la fois à l'effet du rayonnement solaire seul, et à l'effet du bilan hydrique calculé avec la formule de Turc utilisant le rayonnement solaire modélisé avec Helios.

Par conséquent, nous pouvons conclure que le rayonnement solaire intervient dans les trois modèles, soit directement, soit à travers l'utilisation du bilan hydrique calculé avec la formule de Turc. Les meilleurs résultats sans variable représentant le rayonnement solaire font intervenir les bilans hydriques calculés avec la formule de Thornthwaite ou de Hargreaves (les D<sup>2</sup> respectifs sont alors de 0.210, 0.347 et 0.338 pour *Acer pseudoplatanus*, *Abies alba*, et *Quercus pubescens*). Quand le rayonnement solaire est disponible, les meilleurs modèles le sont en incluant le calcul du bilan hydrique utilisant la formule de Turc et les D<sup>2</sup> augmentent respectivement à 0.235, 0.364, et 0.358 pour les mêmes trois espèces.

Il apparaît donc que les radiations solaires et encore plus les bilans hydriques calculés avec la formule de Turc sont des variables qui permettent d'expliquer la distribution des espèces et améliorent la capacité prédictive des modèles.

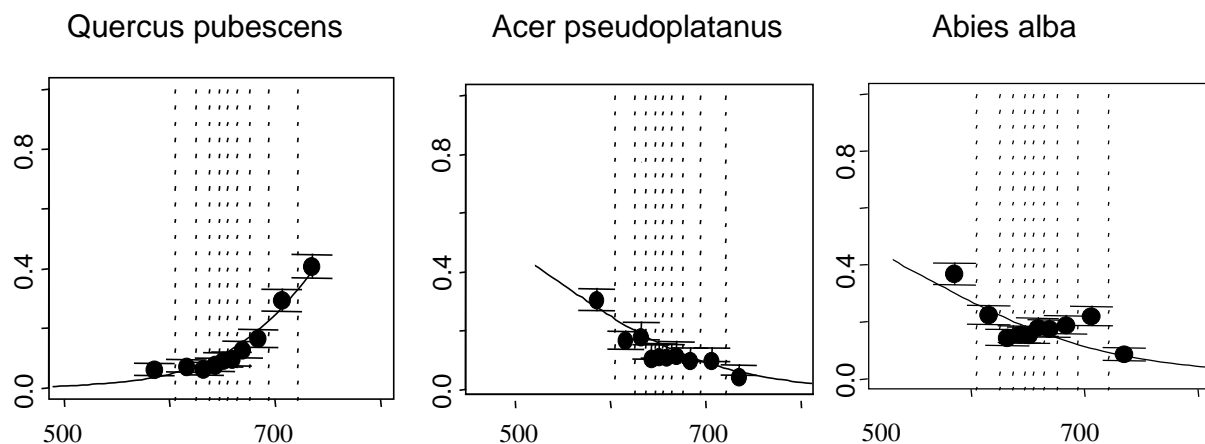


Figure 22. Probabilité de présence du *Quercus pubescens*, *Acer pseudoplatanus*, et *Abies alba* et fonction du rayonnement solaire du mois de Juin calculé avec le programme Helios (MJ/m<sup>2</sup>)

#### 5.1.4 Analyse du degré de complexité nécessaire pour bien modéliser le rayonnement solaire (réalisé par l'ENGREF)

Différentes méthodes de calcul permettent d'obtenir des données de rayonnement solaire : des modèles SIG, qui offrent des qualités de résultats variables selon la complexité du programme (voir comparaisons dans ce rapport), ou des données satellitales comme celles de SATMOS. Cependant, l'utilisation de ces données est conditionnée par leur facilité d'obtention et d'utilisation. Aussi, lorsqu'on examine la littérature scientifique, on s'aperçoit que de nombreux indices simplifiés sont utilisés, plus facile à mettre en oeuvre. En effet, plus l'indice est complexe, plus il est long à calculer et nécessite de données en intrant. Cela mène naturellement à s'interroger sur la validité de ces indices simples à calculer, et à l'intérêt d'en calculer de plus complexes. Or, il existe très peu de documentation permettant de connaître la validité et la capacité prédictive de ces différentes approches.

Ce travail a donné lieu à l'écriture d'un article scientifique qui a été soumis à la revue internationale « Agricultural and forest meteorology » sous la référence suivante : Piedallu, C., Gégout, J.C. : Assessment of efficient topographic solar radiation to improve large-scale plant distribution models, 2007, soumis. L'article figure en Annexe 3.

##### 5.1.4.1 Objectifs et méthode

La méthode la plus simple utilisée par les chercheurs pour estimer le rayonnement solaire est de les dériver à partir de valeurs de pentes ou d'exposition. Ces variables sont souvent utilisées car elles sont faciles à mesurer sur le terrain ou à calculer (Carroll et al., 1999; Clark et al., 1999). L'exposition étant une variable circulaire, les écologues calculent leur sinus ou leur cosinus afin d'obtenir une variable traduisant un gradient. D'autre part, depuis le développement des SIG dans les années 1990, différents modèles radiatifs ont été réalisés et sont utilisés dans de nombreuses études écologiques. Ils sont plus ou moins sophistiqués et faciles à mettre en oeuvre, la plupart d'entre eux n'étant pas conçus pour travailler sur de larges emprises du fait de la non prise en compte des variations de latitude ou de nébulosité.

L'efficacité de ces différentes méthodes de calcul n'a jamais été comparée, bien qu'elles soient couramment utilisées. De nombreux modèles permettent un calcul sous ciel clair, mais l'effet de la nébulosité sur la qualité de la simulation du rayonnement, et sa capacité à prédire la ressource forestière, semblent n'avoir jamais été évalués. Aussi, notre objectif est comparer 5 méthodes de

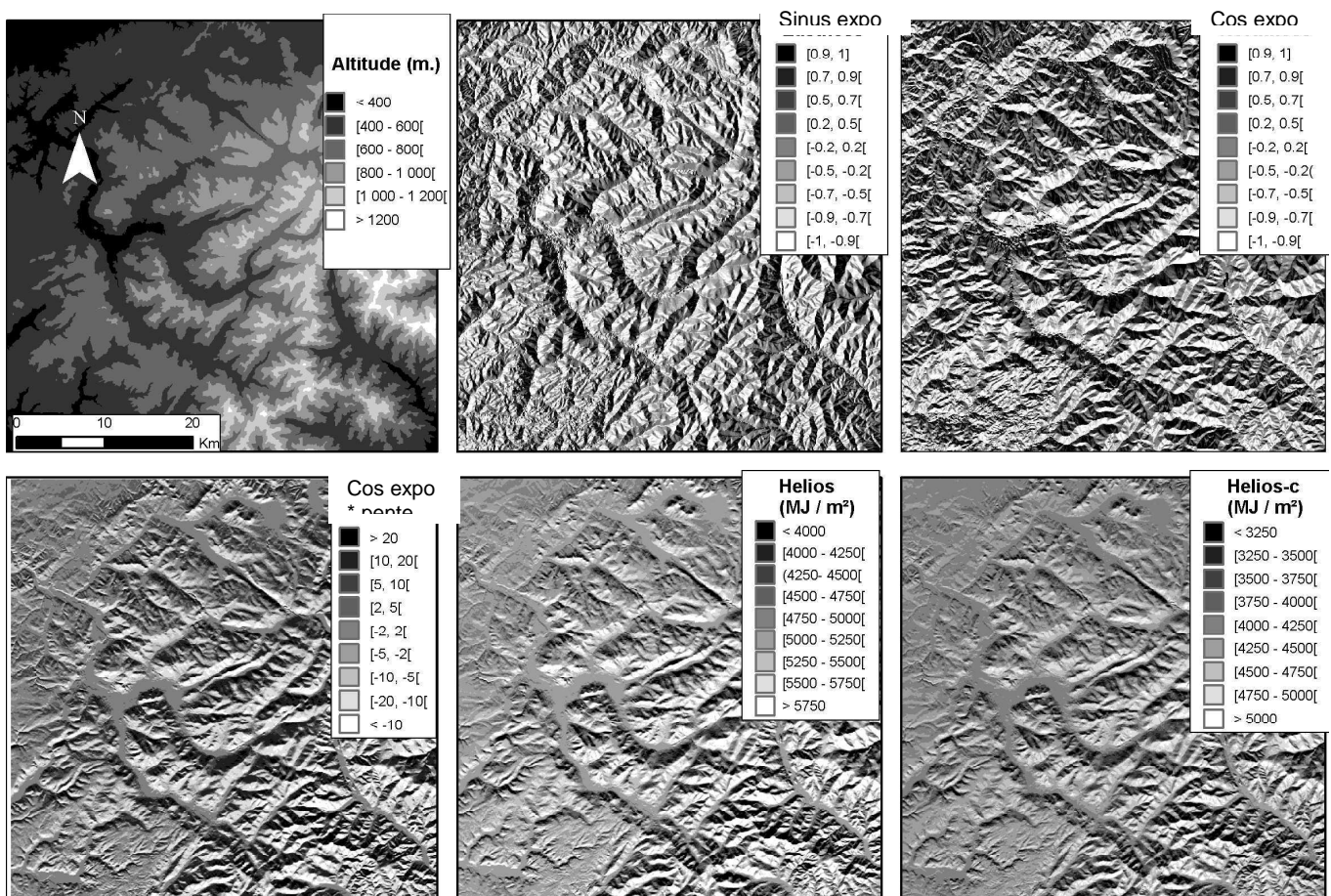
calcul, la dérivation du sinus et le cosinus de la pente, l'interaction entre la pente et le cosinus de l'exposition, et le rayonnement solaire calculé sans et avec nébulosité. Ces deux derniers calculs seront réalisés à l'aide du programme Helios décrit ci dessus.

Pour comparer l'effet de ces 5 estimations, nous avons choisi dans un premier temps de valider les calculs avec le jeu de 88 postes météo France décrit précédemment. Dans un deuxième temps nous comparerons leur capacité prédictive vis-à-vis de trois essences forestières en utilisant la méthode employée pour démontrer l'efficacité du calcul réalisé avec Helios et décrite au chapitre 5.1.3.1.

### 5.1.4.2 Résultats

#### 5.1.4.2.1 Calcul et validation des indices

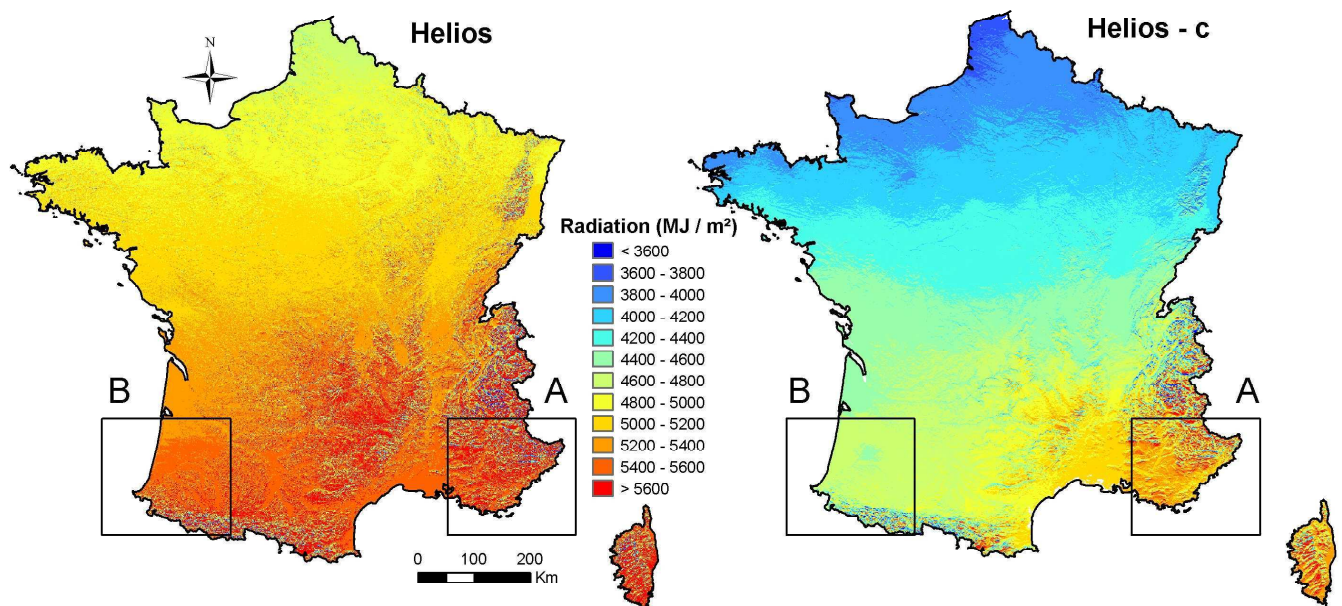
Le sinus et le cosinus de la pente, l'interaction entre la pente et le cosinus de l'exposition, et le rayonnement solaire calculé sans et avec nébulosité ont été calculés par pixels de 50 mètres de côté sur toute la France (**Figure 23**).



**Figure 23.** Extrait des cartes nationales centrées sur le sud des montagnes Vosgiennes (6°30" longitude et 48' latitude) montrant les différences entre les indices de rayonnement solaire en terrain montagneux. Les calculs du sinus, du cosinus de l'exposition, l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, le rayonnement sans nébulosité (Helios) et avec nébulosité calculés avec Helios (Helios-c) ont été cartographiés.



A l'échelle de la France, les cartes de rayonnement solaire avec et sans nébulosité montrent des différences à la fois en terme de valeurs et de répartition spatiale. En effet, si le rayonnement solaire calculé sans nébulosité (appelé Helios) varie entre 1400 et 8000 MJ/m<sup>2</sup>, avec une valeur moyenne de 5200 MJ/m<sup>2</sup>, les valeurs calculées avec la nébulosité (Helios-c) sont naturellement plus basses, s'échelonnant entre 1200 et 7200 MJ/m<sup>2</sup> avec une valeur moyenne de 4500 MJ/m<sup>2</sup>. L'effet de la nébulosité accentue les différences nord/sud et introduit des différences est/ouest (**Figure 24**). Par exemple, sont mis en évidence des climats régionaux comme la Provence qui présente de fort taux d'insolation (zone notée A dans la carte Helios-c), que l'on peut comparer à une insolation relativement plus basse dans le pays basque, à une latitude identique (notée B).



**Figure 24.** Rayonnement solaire annuel en France, calcul sous ciel clair (Helios) et ciel nuageux (Helios-c) (MJ/m<sup>2</sup>). A : Provence avec un fort rayonnement, B: Pays Basque à la même latitude et avec un rayonnement plus faible avec Helios-c.

Les corrélations entre le sinus de l'exposition et les autres indices sont faibles ( $R^2 < 0.02$ ). Elles sont plus importantes entre le cosinus de l'exposition, et son interaction avec la pente, et le rayonnement solaire simulé avec Helios. L'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente est la mesure qui peut être enregistrée sur le terrain la mieux corrélée au rayonnement simulé par Helios. La corrélation maximale est atteinte entre les valeurs annuelles calculées par Helios avec et sans nébulosité ( $R^2 0.93$ ) (**Tableau 13**).

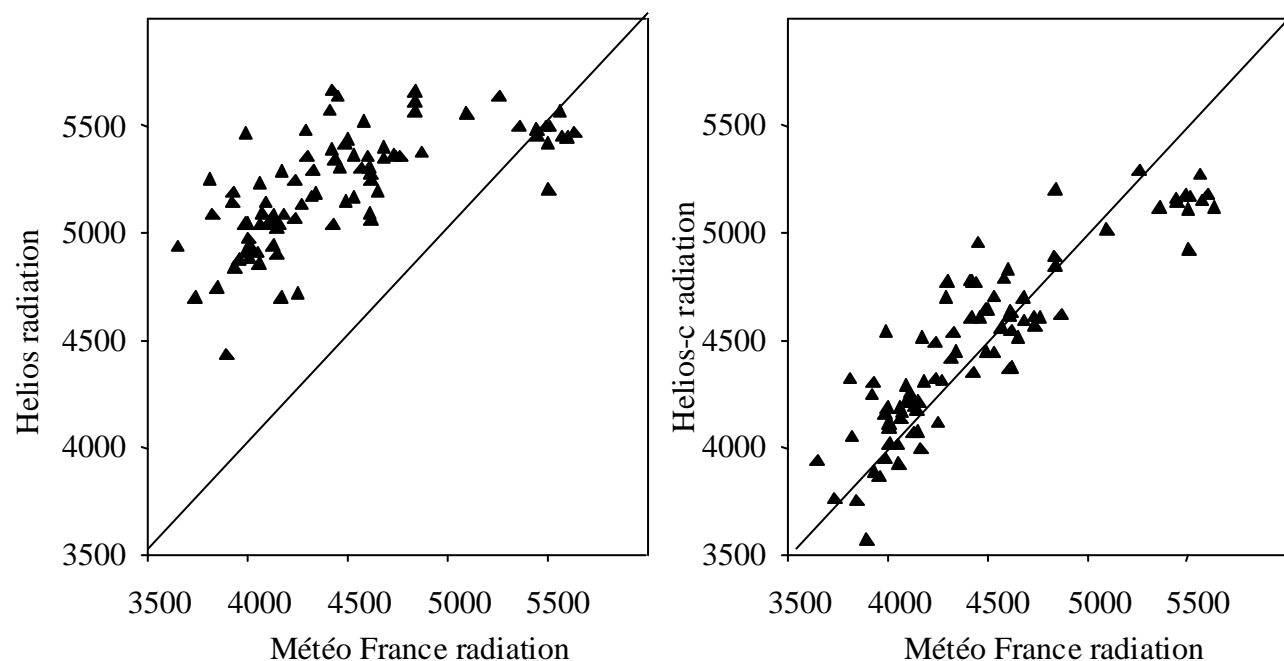
	<i>Sinus expo</i>	<i>Cos expo</i>	<i>cosexpo*pen</i>	<i>Helios</i>	<i>Helios-c</i>
Sinus expo	1	0.020	0.011	0.001	0.006
Cos expo		1	0.525	0.300	0.420
Cos expo * pente			1	0.590	0.790
Helios				1	0.930
Helios-c					1

**Tableau 13.** Correlation ( $R^2$ ) entre le sinus, le cosinus de l'exposition, l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, le rayonnement calculé avec Helios sans nébulosité (Helios) et avec (Helios-c).

En comparant les différentes estimations aux 88 postes Météo France, on s'aperçoit que les résultats sont très différents selon la méthode utilisée (**Tableau 14**). Les dérivées de l'exposition, qu'elles soient couplées ou non avec la pente, sont très peu corrélées aux mesures de Météo France ( $R^2 < 0.02$ ). Le rayonnement solaire calculé sans nébulosité montre une meilleure corrélation, mais nettement inférieure à celle du modèle sous ciel nuageux ( $R^2$  0.78 contre 0.46 pour le modèle sous ciel clair) (**Figure 25**).

	<i>Jan.</i>	<i>Fev.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil</i>	<i>Aout</i>	<i>Sept.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dec.</i>	<i>Année</i>
Sinus expo	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00
Cos expo	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Cosexpo * pte	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Helios	0,72	0,62	0,53	0,29	0,01	0,00	0,12	0,25	0,46	0,58	0,68	0,76	0,46
Helios-c	0,88	0,84	0,81	0,60	0,60	0,62	0,68	0,65	0,72	0,78	0,84	0,88	0,78

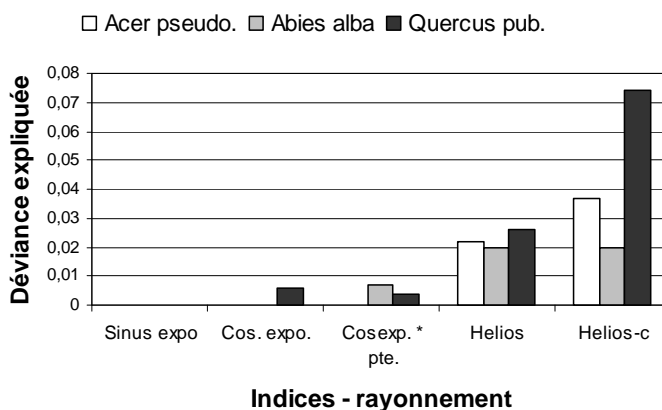
**Tableau 14.** Coefficient de corrélation ( $R^2$ ) entre le rayonnement solaire mesuré (88 postes Météo France) et les 5 estimations du rayonnement : sinus, cosinus de l'exposition, interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, le rayonnement sans nébulosité (Helios) et avec nébulosité calculés avec Helios (helios-c).



**Figure 25.** Corrélation entre le rayonnement solaire annuel mesuré sur les postes de Météo France des valeurs annuelles d' Helios nébulosité (A) et avec (B) (MJ/m<sup>2</sup>).

#### 5.1.4.2.2 Effet des indices sur la distribution des espèces

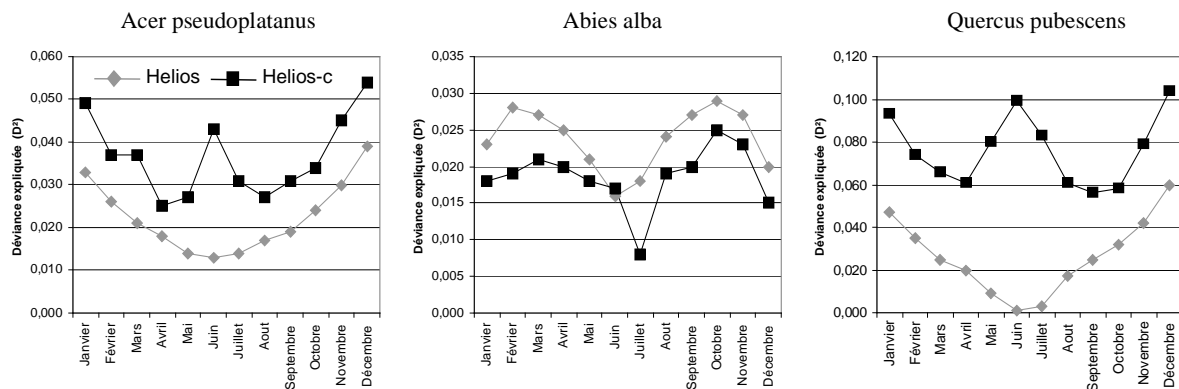
La réalisation de modèles univariés entre les indices de rayonnement solaire et *Acer pseudoplatanus*, *Abies alba* ou *Quercus pubescens* montrent que les indices basés sur le calcul d'exposition (sinus, cosinus, interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente) ne sont pas très efficaces pour prédire la distribution de ces espèces à l'échelle de la France (**Figure 26**).



**Figure 26.** Part de déviance expliquée (D<sup>2</sup>) pour les modèles univariés de distribution d'Acer campestre, Abies alba et Quercus pubescens (n = 6219). Le sinus de l'exposition, le cosinus de l'exposition, l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, le rayonnement solaire sans (Helios) et avec nébulosité sont comparés.

L'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, qui explique une petite part de la déviance de *Abies alba* et *Quercus pubescens*, est le meilleur de ces trois indices, mais il explique une part de déviance bien moindre que le modèle SIG. La plus forte capacité prédictive de la distribution d'*Acer pseudoplatanus* ( $D^2$  0.037) et de la distribution de *Quercus pubescens* est observée avec Helios-c ( $D^2 = 0.074$ , **Figure 26**). Pour *Abies alba*, la déviance expliquée en utilisant le rayonnement solaire est identique si on prend en compte ou pas la nébulosité ( $D^2 = 0.020$ ).

Si on examine la capacité prédictive du rayonnement calculé avec le modèle Helios mois par mois, on observe que pour *Acer pseudoplatanus* et *Quercus pubescens* les valeurs d'hiver ont une meilleure capacité prédictive que celles d'été (**Figure 27**). Quand l'effet de la nébulosité est éliminé, l'effet estival disparaît, et d'importantes différences apparaissent. Ainsi, pour *Quercus pubescens*, la déviance expliquée décroît de 0.099 à 0.001 pour juin. Pour *Abies alba*, la plus grande part de déviance expliquée l'est au printemps et en automne.

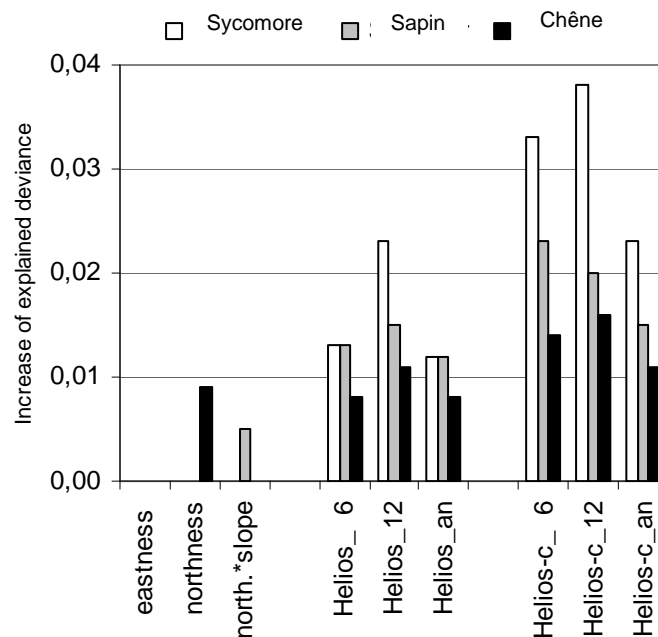


**Figure 27.** Part de déviance expliquée ( $D^2$ ) par les valeurs mensuelles de rayonnement solaire avec (Hélios-c) et sans nébulosité (Helios) pour modéliser la distribution d'*Acer pseudoplatanus*, *Abies alba*, et *Quercus pubescens* ( $n = 6219$ ).

Les différents indices permettant d'estimer le rayonnement solaire ont ensuite été utilisés en combinaison avec d'autres variables écologiques pour prédire la distribution des espèces. Le protocole décrit précédemment a été utilisé et les mêmes variables candidates ont été testées (précipitations moyennes annuelles, MaP, températures moyennes annuelles, MaT, altitude et pH) (Cf chapitre 5.1.3.1). Un modèle a été réalisé sans estimateur du rayonnement solaire, ce sera le modèle « étalon », et ensuite 5 nouveaux modèles ont été réalisés en incluant les indices de rayonnement l'un après l'autre comme variables candidates. En ce qui concerne le rayonnement solaire calculé avec Helios, nous avons choisi de tester le rayonnement annuel ainsi que les valeurs mensuelles de juin et de décembre, du fait de leur importance dans l'analyse précédente. Les corrélations sont faibles entre les estimateurs du rayonnement solaire et les autres variables environnementales ; le  $R^2$  s'échelonnant entre  $5.10^{-5}$  entre MaP ou pH et le sinus de l'exposition et 0.066 entre le pH et Helios-c pour le mois de juin. Les meilleurs modèles obtenus sans estimateur du rayonnement solaire ont, pour *Quercus pubescens* un  $D^2$  de 0.341, pour *Abies alba* de 0.332 et pour *Acer pseudoplatanus* de 0.183.

Les modèles multivariés intégrant un à un les estimateurs du rayonnement montrent que les indices dérivés de l'exposition ont un effet très faible sur la distribution des espèces étudiées, généralement non significatif, sauf pour *Quercus pubescens* et *Abies alba*, pour lesquels respectivement le cosinus de l'exposition et l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente augmente légèrement la déviance expliquée (**Figure 28**). Pour les trois espèces étudiées, le modèle Helios, avec ou sans nébulosité, donne de meilleurs résultats que les autres indices ( $p < 0.001$ ). Le calcul prenant en compte la nébulosité (Helios-c) donne dans tous les cas de meilleures performances que le modèle sous ciel clair. Le fait d'avoir une valeur de rayonnement mensuel calculé avec nébulosité dans le

modèle permet une augmentation significative de  $D^2$ , de 0.184 à 0.221 pour *Acer pseudoplatanus*, 0.332 à 0.355 pour *Abies alba*, et de 0.341 à 0.355 pour *Quercus pubescens*.



**Figure 28.** Augmentation de la variance expliquée pour les modèles de distribution d'*Acer pseudoplatanus*, d'*Abies alba* et *Quercus pubescens*, en incluant alternativement une des estimations étudiées de rayonnement solaire, comparativement au modèle de référence qui ne prend pas en compte le rayonnement solaire. Ce modèle de référence a comme variables candidates l'altitude, les températures moyennes annuelles, les précipitations et le pH des sols. Les estimateurs du rayonnement solaire testés sont le cosinus de l'exposition, son sinus, l'interaction entre le cosinus de l'exposition et la pente, et le calcul SIG du rayonnement solaire sans nébulosité (Helios) et avec (Helios-c) pour juin (suffixe 6, décembre (suffixe 12), et l'année entière (suffixe an).

### 5.1.4.3 Conclusion

Nos résultats montrent que le choix des estimateurs de rayonnement solaire est important et que les résultats peuvent varier de façon importante selon la méthode de calcul choisie. Les calculs de sinus, cosinus de l'exposition avec ou sans interaction avec la pente ne sont pas efficaces ni pour estimer le rayonnement solaire ni pour prédire la distribution des trois espèces étudiées à l'échelle de la France. Cela est probablement dû à la grande taille du site d'étude. En effet, il y a de ce fait une large amplitude des latitudes, permettant d'avoir une valeur de rayonnement identique dans les pentes nord du sud de la France et dans les pentes sud du nord de la France. Le fait d'inclure les précipitations et les températures dans les modèles de distribution des espèces élimine cet effet latitudinal mais, même dans ce cas, ces indices ont un pouvoir prédictif très faible.

Les valeurs de rayonnement calculées avec un modèle SIG donnent de bien meilleurs résultats, mais des différences importantes apparaissent selon la méthode de calcul utilisée. Ainsi, il apparaît essentiel de prendre en compte l'action de la nébulosité. Cela est particulièrement vrai au printemps et en été, le modèle réalisé sous ciel clair n'étant plus corrélé avec les mesures météo en mai ou juin. Cela peut s'expliquer par la faible variabilité du rayonnement solaire à cette époque ou le soleil est haut dans le ciel, et par la haute variabilité de la nébulosité pour cette même époque. Ces résultats justifient de déconseiller l'usage de modèles ne prenant pas en compte la couverture nuageuse à

l'échelle d'un pays comme la France. Ces résultats corroborent l'analyse du modèle Solar analyst effectuée précédemment.

### **5.1.5 Conclusion générale concernant le calcul du rayonnement solaire et des bilans hydriques (ENGREF)**

Au cours de ce chapitre concernant la validation des modèles SIG, nous avons démontré que les méthodes d'estimation du rayonnement solaire pouvaient conduire à des résultats très différents. Les indices simplifiés dérivés des calculs de pente ou d'exposition ne sont pas de bons estimateurs du rayonnement solaire à l'échelle de la France. Les modèles SIG qui ne prennent pas en compte la variabilité de latitude et surtout de nébulosité ne sont pas non plus capables de prédire des valeurs correctes à l'échelle de la France, c'est le cas par exemple de Solar analyst. Les meilleurs résultats sont obtenus par les données satellitales de Meteo France, SATMOS, puis par le modèle SIG prenant en compte la latitude et la nébulosité, Helios. SATMOS est fortement corrélé aux 31 postes de mesure auxquels il a été comparé. La limite de ces données réside cependant dans leur forte résolution (pixels de 3 km de côté). De ce fait, la variabilité topographique n'est pas prise en compte et les résultats en zone de relief risquent d'être erronés. Or, les 31 postes de mesures utilisés sont situés en zone de plaine et ne peuvent mettre en évidence ce problème. Par contre, quand on compare SATMOS aux modèles SIG, les écarts apparaissent nettement plus importants en montagne qu'en zone de plaine. Une analyse complémentaire visant à valider SATMOS en zone de montagne serait nécessaire. Le modèle SIG Helios donne des résultats moins bons que les mesures satellitales de SATMOS, principalement en été, mais à l'avantage de fournir une information par cellule de 50 m de côté et de prendre en compte l'effet de la topographie. On obtient ainsi un  $R^2$  annuel de 0.78 avec 88 postes de validation répartis sur tout le territoire, et si on note une petite dégradation en zone de montagne, celle-ci reste modérée. Ainsi, sur 11 stations météorologiques situées sur des versants allant de 5° à 38° (valeur moyenne 14°), l'erreur moyenne absolue passe d'environ 200 MJ/m<sup>2</sup> à environ 300 MJ/m<sup>2</sup>. Du fait de l'imprécision de positionnement du poste météo (100-200 m), cette dégradation est tout à fait acceptable.

Ainsi, il n'existe donc pas de solution idéale dans le choix de la méthode de calcul, mais des compromis, qui peuvent éventuellement répondre à des problématiques différentes. Si on veut cartographier le meilleur rayonnement possible à l'échelle de la France le choix de SATMOS s'impose naturellement. Si on souhaite connaître la valeur la plus précise en un point dans une zone de relief, Helios a de fortes chances de donner de meilleurs résultats. Il faut également prêter attention à la résolution temporelle et la période couverte par chacun des modèles. Les données SATMOS considérées couvrent la période 1996-2002 tandis qu'Helios a été calculé pour la période 1961-1990, une mise à jour 1971-2000 étant prévue. Une solution à étudier pourrait passer par la combinaison d'un modèle satellital comme SATMOS qui permettrait d'obtenir des valeurs moyennes les plus proches de la réalité, et qui serait couplé à un modèle topographique SIG semblable à Helios qui peut calculer une variabilité topographique intrapixels.

La démonstration de l'efficacité du rayonnement solaire pour prédire la distribution de trois essences a été mise en évidence et apporte plusieurs éclairages. D'abord, si nous avons démontré que nous étions capables de calculer un rayonnement solaire avec une relativement bonne précision, il était nécessaire de savoir si ce rayonnement simulé avait une influence sur la végétation. En effet, l'objectif est bien d'utiliser les variables spatialisées produites en temps que critère de discrimination des stations forestières. La capacité prédictive du rayonnement solaire calculé avec Helios a été prouvée. Ensuite, la validation « biologique » conforte pleinement la validation faite sur les postes météo France : on retrouve l'effet prépondérant du rayonnement prenant en compte la nébulosité, et on identifie des périodes dans l'année où le rayonnement est plus explicatif que d'autres. Soulignons au passage l'importance de la nébulosité dans le calcul du rayonnement d'été, qui perd tout son pouvoir prédictif si elle n'est pas prise en compte. Il est également intéressant de constater le fort pouvoir

prédictif des mois d'hiver, qui peut s'expliquer de différentes façons. D'abord le rayonnement a un effet physiologique sur les espèces même pendant les mois d'hiver, ensuite l'hiver le soleil est le plus bas et donc met en exergue les effets de versants, qui sont corrélés à d'autres facteurs (richesse, chimique, humidité du sol, neige ...). Enfin, le rayonnement d'hiver est celui qui est le mieux prédit de l'année. Cependant, il est nécessaire de continuer ce travail pour confirmer les résultats obtenus, en prenant en compte un nombre plus important d'espèces, afin de mieux comprendre leur écologie, et en analysant l'effet physiologique du rayonnement sur l'espèce selon la période considérée.

Enfin, nous avons également mis en évidence les différences entre les méthodes de calcul des ETP et les bilans hydriques climatiques qui en découlent. En comparant les ETP estimées selon différentes méthodes avec des mesures de terrain, nous nous apercevons qu'il y a des différences importantes, les ETP Hargreave semblant donner de meilleurs résultats devant Turc, Thornthwaite étant la moins proche de la mesure. Ce type de validation serait à généraliser sur un nombre plus important de postes de mesure, sachant qu'il faut utiliser pour cela des mesures sur cases lysimétriques effectuées hors réseau Météo France afin d'éviter tout biais, le modèle AURELHY ayant été construit à partir des postes météo. Peu de mesures de ce type ayant été réalisées, une validation plus large est difficile à réaliser, bien que nécessaire. Il est également intéressant de noter que lors de l'étape de validation avec les postes de l'INRA, les valeurs SIG apparaissent comme étant assez proches des valeurs mesurées sur les postes météo, confirmant l'intérêt de ce type de donnée.

Utilisées pour modéliser la distribution des espèces, ce ne sont plus les ETP hargreave mais les ETP Turc, intégrées dans le calcul du bilan hydrique, qui donnent les meilleurs résultats. Ceci est imputable à la résolution de travail. En effet, les calculs des ETP Hargreave ou Thornthwaite sont basés sur les données du modèle AURELHY et leur résolution est kilométrique. Par contre, les calculs de l'ETP Turc intègrent le rayonnement solaire et sont disponibles à une résolution de 50 mètres de côté, prenant en compte assez finement les variations topographiques. La validation des ETP avec les postes de mesures de l'INRA a été réalisée sur sol plat, et dans ces conditions l'ETP Hargreave apparaît comme étant la meilleure. Par contre, la réalisation des modèles de distribution s'est faite sur zone parfois pentue, et l'effet de la résolution rend l'ETP Turc plus performante.

## **5.2 Validation des calculs de réserve utile maximale des sols** (réalisé par l'ENGREF)

La validation des cartes de RUM est difficile à réaliser. Très peu de mesures de laboratoires existent en France, elles sont principalement réalisées en milieu ouvert, et ont déjà été utilisées pour calibrer les FPT de Bruand, qui ont servi à élaborer la carte. Aussi, il faut s'orienter vers d'autres moyens. Le calcul d'un jeu de validation indépendant, avec des méthodes plus élaborées que l'utilisation des FPTC, est une piste. Elle n'a pu être mise en place vu le temps imparti pour le projet et la quantité de travail réalisé, mais elle fera l'objet de travaux complémentaires. Pour cela, il aurait été utile d'utiliser des analyses de textures faites en laboratoire et couplées à des analyses de densité apparente. Malheureusement trop peu de relevés possédant ces caractéristiques existent actuellement en France. Mais il est possible de modéliser la densité apparente à partir du taux de carbone, de la profondeur, et de la pierrosité. Un nombre conséquent de placettes de la base Ecoplant contient ces caractéristiques, et peuvent servir à la création d'un jeu de validation indépendant. Des analyses en cours de réalisation sur le réseau Européen (Programme BIOSOL-IFN) seraient également potentiellement utilisables.

Une deuxième façon de valider les cartes consiste à étudier l'effet de la RUM sur la fertilité des trois essences déjà étudiées (*Picea abies*, *Fagus sylvatica*, et *Quercus petraea*). L'objectif de cette étude est double : d'abord montrer que la RUM calculée a une capacité prédictive sur la fertilité de ces trois essences, ensuite établir le domaine de validité de la carte, c'est-à-dire la gamme d'échelles où la carte est efficace pour prédire la fertilité des essences étudiées. En effet, il est nécessaire d'examiner

si la capacité prédictive de la carte est dépendante ou non de l'échelle. Pour cela, le territoire français est d'abord considéré dans son ensemble, puis il est découpé en carrés de 200 km de coté, puis 100, 50, 25, 10, 5 km, correspondant à des échelles de travail de plus en plus locales. Pour chaque échelle considérée, nous avons corrélé les valeurs de RUM de la carte réalisée selon la méthode Bruand-3 à 50 m de résolution avec les indices de fertilité calculés pour les trois espèces étudiées. On obtient donc un certain nombre de répétitions pour chaque échelle, ce nombre étant le plus élevé pour des échelles intermédiaires (surfaces comprises entre 25 et 100 km de coté). En effet, pour les cellules les plus grosses, la surface de la France limite le nombre de répétitions, et pour les cellules les plus petites, c'est le nombre de placettes pour lesquelles un indice de fertilité a été calculé qui est le facteur limitant. En effet, au deçà de 10 placettes par essence ayant un indice de fertilité calculé, nous avons estimés qu'il n'y avait pas assez de répétitions pour calculer le R<sup>2</sup>.

Les corrélations (R<sup>2</sup>) pour chaque échelle étudiée ont été moyennées et comparées, et nous avons essayé d'expliquer la variabilité enregistrée pour une même taille de cellules en utilisant des régressions multiples. Les résultats figurant dans le **Tableau 15** montrent d'une part que la RUM explique une part relativement importante de la variance de la fertilité de *Fagus sylvatica*, *Picea abies* et *Quercus petraea*. A l'échelle nationale, c'est pour le hêtre que la part de variance expliquée est la plus faible (R<sup>2</sup> 0.125), et pour l'épicéa qu'elle est la plus forte (R<sup>2</sup> 0.209). On constate également que ces corrélations semblent relativement indépendantes de l'échelle, et que la carte de la RUM est utile pour prédire la fertilité sur toute la gamme des échelles étudiées. Il n'a malheureusement pas été possible de descendre au-delà de 100 km<sup>2</sup> pour le hêtre, 25 km<sup>2</sup> pour l'épicéa, et 625 km<sup>2</sup> pour le chêne sessile, de fait de l'absence d'une densité suffisante de calculs d'indice de fertilité à des échelles plus locales. Cependant, on peut en déduire que la carte a une relativement forte capacité prédictive pour toutes les échelles étudiées.

	Fagus sylvatica			Picea abies			Quercus petraea		
	repet.	R <sup>2</sup>	ET	repet.	R <sup>2</sup>	ET	repet.	R <sup>2</sup>	ET
France	1	0,125	NDT	1	0,209	NDT	1	0,168	NDT
200 km	13	0,090	0,07	6	0,140	0,20	11	0,168	0,19
100 km	25	0,150	0,18	17	0,164	0,17	20	0,089	0,11
50 km	29	0,100	0,15	36	0,107	0,14	23	0,096	0,16
25 km	16	0,126	0,16	54	0,146	0,17	11	0,082	0,09
10 km	4	0,123	0,18	51	0,156	0,20	0	NDT	NDT
5 km	0	NDT	NDT	8	0,166	0,20	0	NDT	NDT

**Tableau 15.** Corrélation moyenne entre les indices de fertilité calculés pour *Picea abies*, *Fagus sylvatica*, et *Quercus robur* et le log de la RUM cartographiée au pas de 50 m. en utilisant la méthode Bruand-3. Le calcul a été réalisé à différentes échelles à l'aide de fenêtres coulissantes. Repet. = nombre de répétitions de calcul de R<sup>2</sup> dans une fenêtre de la taille spécifiée, étant donné qu'il faut au moins 10 répétitions pour que le R<sup>2</sup> soit calculé à l'échelle considérée. ET = écart type. NDT : pas calculé pour cause d'un nombre de répétitions insuffisant.

Derrière ces chiffres se cachent de grosses disparités. En effet, nous voyons que l'écart type des R<sup>2</sup> est important quelle que soit l'échelle étudiée. Cela veut dire que pour deux cellules voisines on peut avoir une carte des RUM qui explique fortement la variance de l'indice de fertilité ou pas du tout. Ainsi, les R<sup>2</sup> varient de 0 à 0.53 pour *Fagus sylvatica*, 0.88 pour *Picea abies*, et 0.65 pour *Quercus petraea*. Afin de d'essayer de comprendre les facteurs conditionnant cette variabilité, nous avons essayé de modéliser le R<sup>2</sup> pour chacune des essences. Pour cela, nous avons assemblé en un seul tableau les R<sup>2</sup> établis entre la RUM et l'indice de fertilité, quelle que soit la taille de la maille, nous avons ainsi réalisé un tableau pour chacune des trois espèces. L'écart type de l'indice de fertilité, la moyenne et l'écart type du log de la RUM dans la maille considérée, le nombre de répétitions dans la maille et la taille de la maille ont été calculées. On obtient ainsi 85 valeurs de R<sup>2</sup> pour *Fagus sylvatica*, 173 valeurs pour *Picea abies*, et 70 pour *Quercus petraea* (**Tableau 16**). On s'aperçoit que d'une façon



générale, quelle que soit l'espèce, plus l'écart type de l'indice de fertilité et du log de la RUM est important, plus le  $R^2$  est élevé. Ainsi, plus il y a de variabilité de l'indice de fertilité et la RUM, plus la RUM est corrélée à l'indice de fertilité. Ceci est logique, une RUM de valeur constante dans une maille ne pouvant être discriminante vis-à-vis de la fertilité de l'essence. De même, pour *Fagus sylvatica* et *Picea abies*, une valeur moyenne de RUM faible augmente l'effet de la RUM sur la fertilité. En effet, il existe un lien logarithmique entre la RUM et la fertilité, une variation de RUM dans les faibles valeurs ayant un effet sur la fertilité plus important qu'une variation d'égale amplitude dans les fortes valeurs, qui est confirmé dans cette analyse. Enfin, pour *Picea abies*, le nombre de répétitions intervient : moins il y a de répétitions, plus le  $R^2$  est élevé. Il s'agit d'un effet mécanique logique et connu, il est toujours plus facile d'ajuster une droite sur un nombre réduit de points que sur un nombre important. Pour chacune des trois essences, aucun effet maille n'est constaté, confirmant l'indépendance du  $R^2$  selon l'échelle observé lors de l'analyse précédente. Cette analyse permet d'expliquer entre 22 et 25 % de la variance des  $R^2$  ( $p$ -value < 0.05), en ne faisant intervenir aucun effet concernant les autres variables environnementales.

	n	ET IF	ET logRUM	MOY logRUM	NB points	Taille Maille	$R^2$
<i>Fagus sylvatica</i>	85	NS	+	-	NS	NS	0,22
<i>Picea abies</i>	173	+	+	-	-	NS	0,25
<i>Quercus petraea</i>	70	+	+	NS	NS	NS	0,24

**Tableau 16.** Modélisation du  $R^2$  entre indice de fertilité de *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, et *Quercus petraea*, et le log de la RUM cartographiée avec la méthode Bruand-3. Les variables candidates sont l'écart type de l'indice de fertilité (ET IF) et du log de la RUM (ET logRUM), et la moyenne du log. de la RUM (MOY logRUM) au sein de la maille considérée, ainsi que le nombre de points pris en compte dans chaque maille (NB points) et la taille de la maille. NS = non significatif au seuil de 5 %, + = relation positive entre le  $R^2$  et la variable, - = relation négative. Figurent également les effectifs (n) et le  $R^2$ .

Ainsi, nous pouvons conclure que la carte des réserves utiles réalisée avec la méthode Bruand-3 au pas de 50 mètres permet d'expliquer une part de la fertilité de *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, et *Quercus petraea*, sur une large gamme d'échelle testée, avec une forte variabilité locale qui est largement dépendante de la distribution des valeurs d'indice de fertilité et de RUM. De ce fait, nous pouvons conseiller l'utilisation de la carte des RUM dans la gamme d'échelle testée, sachant qu'il y aura plus de chance que la RUM ne soit pas explicative de la fertilité si sa valeur est élevée et son écart type faible. Cette analyse serait à poursuivre avec d'autres essences, et avec un jeu de données complémentaires permettant une validation à des échelles encore plus fines.

## 6 Relation entre les indices calculés et la flore

### 6.1 Lien entre les indicées créées et la flore forestière Française (réalisé par l'ENGREF)

Si certain des indices déjà réalisés par l'ENGREF ont été validés à l'aide de mesures de distribution de fertilité d'essences forestières, aucune comparaison de l'efficacité des différents indices n'a été réalisée sur un grand nombre d'espèces. Nous proposons dans cette partie de réaliser une AFC sur un grand nombre de relevés forestiers afin d'obtenir des indicateurs synthétiques discriminant la flore forestière, et de chercher à corrélérer les indices réalisés aux axes de l'AFC afin de tester leur pertinence.

### **6.1.1 Réalisation d' une AFC sur la France entière**

Une analyse factorielle des correspondances à été réalisée sur un ensemble de 16 427 relevés forestiers répartis sur toute la France et séparés les uns des autres de plus de 0,5 km afin d'éviter des phénomènes d'autocorrélation spatiale, susceptibles d'ajouter des effets locaux aux gradients analysés. Le tableau des 16 427 relevés et des 782 espèces présentes dans au moins 50 relevés a été analysé en présence/absence. Une analyse préalable a permis de corrélérer les principaux axes aux variables écologiques présentes dans la base de donnée EcoPlant et d'identifier que seuls les trois premiers facteurs ont un sens écologique clair.

La variable la plus corrélée au premier axe est le bilan hydrique climatique du mois le plus chaud de l'année (juillet). D'un point de vue géographique, les coordonnées sur l'axe 1 opposent les relevés de la région méditerranéenne à ceux du reste de la France. La variable la plus corrélée à l'axe 2 de l'AFC est l'altitude. L'axe 2 oppose donc les régions de montagne à la France collinéenne. La variable directe la plus corrélée à cet axe est l'ETP de printemps calculé de mars à mai selon la formule de Thornthwaite. Cette période est la période de croissance des végétaux, comprise entre les froids hivernaux, importants jusqu'en février, et la sécheresse estivale qui commence dès juin dans le sud de la France. Cette période est cohérente avec la signification de l'ETP qui combine température et rayonnement (à travers la latitude) pour fournir un indice intégré de productivité. Pour ce deuxième axe comme pour le premier, aucun modèle multivarié n'apporte d'amélioration significative par rapport aux modèles univariés. Le pH et le rapport S/T sont les deux variables les plus corrélées au troisième axe factoriel. Les modèles multivariés associant le C/N permettent d'améliorer le modèle. Ces couples de variables qui représentent la nutrition en azote, calcium, magnésium, potassium ainsi que la toxicité aluminique et l'acidité mettent clairement en évidence le lien entre la nutrition minérale et l'axe 3 de l'AFC. Le gradient intègre cependant une composante climatique car le meilleur modèle relié à l'axe 3 de l'AFC comprend le S/T, le C/N et les températures minimales du mois de janvier, le plus froid de l'année. L'axe oppose globalement l'est de la France, froid en hiver et avec un bon niveau trophique général, à l'ouest plus tempéré en hiver et plus acide.

En résumé, le bilan hydrique de la saison sèche, l'ETP de printemps corrélée à la période de végétation, et la nutrition minérale sont les trois principaux gradients qui contrôlent la distribution de la végétation forestière en France. Ces axes sont représentatifs des gradients qui structurent la végétation au niveau mondial (Holdridge, 1947; Prentice, 1992). Nous allons comparer l'effet des variables spatialisées que nous avons calculées vis-à-vis des axes 1 et 2 de l'AFC, qui ont un sens climatique, en établissant des corrélations.

### **6.1.2 Corrélation entre les indices calculés sous SIG et les axes F1 et F2 de l'AFC**

De nombreux calculs ont été réalisés au cours de cette étude, dont un grand nombre ayant une résolution mensuelle. Ainsi, il a fallu sélectionner un certain nombre de variables. Pour cela nous nous sommes appuyés sur les analyses réalisées précédemment pour identifier les variables suivantes :

- indice de De Martonne annuel
- indice de Gams
- rayonnement solaire de juin, décembre et annuel
- ETP Thornthwaite, Turc et Hargreaves, mois de juin, décembre, et valeur annuelle
- Bilans hydriques climatiques calculés avec les ETP de Thornthwaite, Turc et Hargreaves, mois de juin, décembre, et valeur annuelle
- RUM des sols
- RU des mois de mai, juillet, septembre et novembre
- Déficit d'évaporation des sols cumulés sur l'année (issus du calcul mensuel des bilans hydriques édaphiques)

Cela donne un total de 29 variables qui ont été croisées avec les 16 427 relevés forestiers ayant servi à faire l'AFC. La précision de localisation des relevés d'EcoPlant est hétéroclite, une première corrélation entre chacune des variables testée et les axes F1 et F2 de l'AFC est d'abord faite, puis une deuxième étape permet de ne traiter que les relevés les plus précis. Dans ce cas, nous avons éliminé les relevés localisés à plus de 100 mètres près, il reste alors 6357 placettes. Un lien linéaire est d'abord testé lors de la régression, puis un lien non linéaire prenant en compte l'effet de la variable et de son carré. L'axe 3 ayant été identifié comme un axe trophique, il n'est pas pris en compte dans cette étude.

Le **Tableau 17** permet de constater que pour l'axe F1, la prise en compte du lien non linéaire permet de meilleurs résultats. Les variables les plus significatives sont les DETOT, les ETP et les Bilans hydriques d'été calculés selon la méthode de Turc, puis les ETP Hargreave d'hiver, et les ETP Turc annuelles et d'hiver. DETOT permet d'obtenir un  $R^2$  de 0.61 sur le jeu total et 0.71 avec le jeu réduit et plus précis. La deuxième variable la plus explicative est l'ETP Turc du mois de juin, avec respectivement un  $R^2$  de 0.53 et 0.62 sur l'ensemble des relevés et sur le jeu le plus précis. Les variables les moins corrélées sont les RU de fin d'année, GAMS, et les bilans hydriques d'hiver.

Différents enseignements peuvent être tirés de cette analyse des corrélations de l'axe F1 :

- les variables de bilans hydriques édaphiques semblent être pertinentes pour expliquer l'axe F1 ;
- les bilans hydriques climatiques de Turc sont globalement plus explicatifs que ceux calculés selon les autres méthodes, ce qui concorde avec les analyses précédentes ;
- on constate une grande hétérogénéité de  $R^2$  selon les ETP et bilans hydriques calculés en utilisant les différentes formules, ainsi que selon la période considérée. Ainsi, le bilan hydrique calculé avec l'ETP Turc présente une forte corrélation ( $R^2$  maxi = 0.59), celui calculé avec l'ETP de décembre étant peu lié ( $R^2$  maxi 0.09).
- les ETP semblent mieux expliquer l'axe 1 que les bilans hydriques (3 ETP dans les 5 premières variables) ;
- la période estivale semble plus concernée que le reste de l'année (dans les 3 premières variables, 2 sont directement liées au mois de Juin) ;

L'hypothèse d'un axe sécheresse est fortement corroborée par cette analyse, les trois premières variables les plus corrélées représentent la sécheresse estivale, en concordance avec les analyses préliminaires déjà réalisées.

Il est un peu plus difficile d'expliquer l'axe 2 que l'axe 1 avec une seule variable, le  $R^2$  maximum est de 0.53 contre 0.71 précédemment. Les variables les plus explicatives sont les ETP Thornthwaite annuelles, de juin, ou de décembre, l'indice de Gams, de De Martonne, ou les ETP Turc annuelles. ETP Thornthwaite annuelle permet d'avoir le meilleur lien ( $R^2$  0.53 avec un lien non linéaire). Les variables les moins significatives sont les RU, le rayonnement solaire, et certaines ETP ou bilans hydriques. On retrouve une très forte hétérogénéité des ETP et BHC selon la méthode de calcul et la période. Les calculs utilisant la formule de Hargreave sont les moins corrélés à cet axe. Les bilans hydriques semblent également être moins corrélés que les ETP.

D'une manière générale, ce ne sont pas les mêmes variables qui discriminent les axes F1 et F2. Si l'axe F1 est un axe « sécheresse », l'axe F2 introduit une dose de continentalité : comme l'indiquent les trois variables les plus prédictives. Cette analyse confirme qu'à travers les calculs d'ETP réalisés, de grandes disparités existent, les ETP semblent avoir un sens différent selon la formule utilisée. Des analyses complémentaires sont nécessaires pour approfondir ces relations entre indices bioclimatiques spatialisés et les axes de l'AFC. Deux points principaux sont à améliorer : la prise en compte des relations non linéaires, car nous avons vu qu'elles jouaient un rôle important ; l'introduction de relations logarithmiques est par exemple à étudier. Il faut également tester un nombre plus important de variables, notamment toutes les valeurs mensuelles, afin de confirmer l'effet saisonnalité qui semble très important. Par exemple, concernant l'axe 2, nous n'avons pas pu

confirmer l'importance des ETP pour la période de début de végétation, faute des variables nécessaires pour cette période exacte.

D'une manière globale, les variables qui semblent les plus explicatives des axes de l'AFC sont les déficits d'évaporation cumulés, les ETP et les déficits hydriques Turcs, et les ETP et bilans hydriques Thornthwaite. Les ETP et bilans hydriques Hargreave donnent de moins bons résultats, ainsi que les bilans hydriques d'hiver, quelle que soit la méthode utilisée, les RU, et le rayonnement solaire. Concernant les RU, il est très intéressant de constater que si elles sont faiblement explicatives, le DETOT qui est provient également du calcul de bilan hydrique édaphique est au contraire une des variables les plus significatives. Il semble donc que dans le cadre du bilan hydrique édaphique les variables synthétiques soient plus intéressantes pour expliquer la flore forestière que les déclinaisons mensuelles. Ceci est à confirmer par d'autres analyses intégrant un nombre plus important de variables issues du calcul de bilan hydrique édaphique. En ce qui concerne le rayonnement solaire, nous constatons ici qu'il ne fait pas partie des variables les plus explicatives lorsqu'il est pris seul, bien que nous ayons démontré qu'il permettait d'améliorer les modèles de distribution de certaines essences. Par contre, une fois intégré au calcul d'ETP et de bilan hydrique à travers l'utilisation de la formule de Turc, on obtient des variables qui sont parmi les plus explicatives. Cela confirme les analyses que nous avons faites précédemment qui avaient mis en évidence l'intérêt des calculs d'ETP et de bilans hydriques climatiques Turc.

Indice	F1	F1-p	F1-NL	F1-NL-p	F2	F2-p	F2-NL	F2-NL-p
De martonne	0,09	0,09	0,12	0,12	0,22	0,26	0,23	0,26
Gams	0,00	0,03	0,02	0,03	0,22	0,06	0,34	0,18
Helios 6	0,20	0,22	0,26	0,29	0,00	0,02	0,06	0,07
Helios 12	0,25	0,34	0,25	0,34	0,01	0,02	0,03	0,03
Helios an	0,17	0,20	0,20	0,26	0,00	0,01	0,1	0,07
Etp ha 6	0,16	0,12	0,20	0,15	0,15	0,16	0,17	0,21
Etp th 6	0,13	0,12	0,22	0,21	0,39	0,36	0,47	0,47
Etp tu 6	0,37	0,45	0,53	0,62	0,16	0,11	0,23	0,22
Etp ha 12	0,44	0,59	0,47	0,62	0,00	0,01	0,06	0,02
Etp th 12	0,22	0,37	0,27	0,45	0,18	0,10	0,32	0,27
Etp tu 12	0,40	0,56	0,45	0,60	0,14	0,06	0,27	0,2
Etp ha an	0,31	0,33	0,36	0,39	0,06	0,05	0,07	0,11
Etp th an	0,28	0,40	0,47	0,58	0,38	0,26	0,53	0,49
Etp tu an	0,38	0,49	0,49	0,59	0,17	0,10	0,3	0,27
Bh ha 6	0,26	0,25	0,39	0,42	0,16	0,18	0,16	0,21
Bh th 6	0,24	0,25	0,37	0,44	0,20	0,20	0,27	0,27
Bh tu 6	0,34	0,34	0,51	0,59	0,16	0,15	0,16	0,19
Bh ha 12	0,09	0,08	0,09	0,08	0,06	0,15	0,06	0,15
Bh th 12	0,07	0,07	0,08	0,07	0,09	0,18	0,12	0,19
Bh tu 12	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,17	0,11	0,19
Bh ha an	0,11	0,10	0,15	0,13	0,13	0,20	0,13	0,2
Bh th an	0,08	0,09	0,10	0,10	0,17	0,23	0,19	0,23
Bh tu an	0,14	0,14	0,21	0,22	0,18	0,22	0,18	0,22
RUM	0,19	0,19	0,26	0,20	0,15	0,22	0,16	0,23
RU 5	0,25	0,26	0,33	0,40	0,03	0,09	0,07	0,11
RU 7	0,14	0,13	0,15	0,14	0,02	0,01	0,02	0,01
RU 9	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
RU 11	0,00	0,00	0,00	0,03	0,12	0,16	0,14	0,19
DE TOT	0,52	0,58	0,61	0,71	0,06	0,03	0,09	0,09

**Tableau 17.** Corrélations ( $R^2$ ) entre une sélection des variables SIG créées et les axes F1 et F2 de l'AFC réalisée sur la France entière  $n = 16383$ , le suffixe -p précisant que nous avons gardé les relevés localisés avec une précision inférieure à 100 m ( $n = 6357$ ). Le terme NL signifie que nous avons testé une relation non linéaire en prenant en compte la variable ainsi que son carré.

## **6.2 Pertinence de ces indices vis-à-vis de la fertilité de plusieurs essences forestières** (réalisé par l'ENGREF)

L'objectif de cette partie est de tester la validité des indices calculés vis-à-vis de la fertilité de plusieurs essences. La fertilité est estimée à partir de la croissance en hauteur dominante. Les indices de fertilité ont été établis pour trois essences, *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, et *Picea abies*, par Ingrid Seynave (Seynave et al, 2004 a et b). Nous allons étudier la corrélation entre les indices de fertilité de ces 3 essences, les indices écologiques créés sous SIG déjà testés dans le chapitre précédent. Nous allons ajouter les températures et les précipitations d'été (juin, juillet et août) afin de vérifier si les indices que nous avons calculés ont une meilleure capacité prédictive que les données issues du modèle AURELHY.

Un certain nombre d'indices ressortent comme ayant une forte capacité prédictive vis-à-vis de la fertilité des 3 essences : il s'agit des ETP Thornthwaite, quelle que soit la période, des températures d'été, des ETP de décembre, quelle que soit la méthode de calcul, des rayonnements solaires d'Helios pour l'hiver ou l'été, ou encore de l'indice De Martonne. Concernant les variables du bilan hydrique édaphique, on constate un effet de la RUM et de RU5.

Cependant, cet inventaire cache de grandes disparités. On constate que pour *Picea abies* et *Fagus sylvatica*, la fertilité semble régie par des paramètres similaires : il y a un fort effet de l'ETP Thornthwaite d'été, expliquant plus d'un tiers de la variance de la fertilité pour les deux essences. La relation entre la fertilité et l'ETP est positive, c'est-à-dire qu'il y a augmentation de la fertilité quand l'ETP est forte. *Quercus petraea* réagit de façon totalement différente en étant quasi indifférent aux variables climatiques, mais en étant sensible à la RUM ( $R^2$  0.17), voire à la RU du printemps. La relation étant positive, *Quercus petraea* aura une fertilité plus forte quand la RUM est élevée. A l'opposé, un certain nombre de variables sont très faiblement corrélées aux indices de fertilité de ces essences, comme les RU des mois d'été de d'automne, le DETOT, les précipitations, Gams, les bilans hydrique d'hiver.

Le fort effet des ETP Thornthwaite est relativement inattendu. En effet, nous avons vu que l'ETP Hargreave est la plus proche de celle mesurée sur case lysimétrique, et nous avons également mis en évidence que l'ETP Turc permettait de mieux prédire la distribution de certaines espèces que les ETP calculées avec les autres formules. Il semblerait donc que l'ETP Thornthwaite, bien que peu performante lorsqu'on l'a validée sur le terrain, ait un sens vis-à-vis de la fertilité de ces essences. On se rend également compte que pour certaines essences ce sont des variables similaires qui semblent les plus explicatives (cas de *Picea abies* et *Fagus sylvatica*), alors qu'elles sont totalement différentes pour d'autres essences (cas de *Quercus petraea*). Nous en déduisons qu'il semble nécessaire de travailler sur un nombre important d'espèces afin de pouvoir tirer d'éventuelles conclusions générales sur les variables qui agissent sur la fertilité. D'autre part, il serait important de tester l'effet de ces variables dans le cadre de régressions multiples, afin de prendre en compte les interactions entre les variables et d'isoler la capacité prédictive de chacun des indices dans le cadre du modèle établi.

Indice	piab		fasy		qupe	
	RL	RNL	RL	RNL	RL	RNL
Gams	0,13	0,15	0,01	0,06	0	0,03
De martonne	0,15	0,16	0,22	0,22	0,02	0,03
Prec 6	0,12	0,16	0,04	0,05	0,01	0,02
Prec 7	0,11	0,16	0	0,05	0	0
Prec 8	0,09	0,12	0,03	0,03	0,02	0,02
Temp 6	0,29	0,31	0,2	0,25	0,02	0,04
Temp 7	0,25	0,27	0,13	0,19	0	0,01
Temp 8	0,29	0,3	0,05	0,21	0	0,02
Helios 6	0,11	0,21	0,13	0,24	0,01	0,04
Helios 12	0,17	0,17	0,21	0,23	0,04	0,04
Helios an	0,1	0,15	0,1	0,16	0,03	0,05
Etp th 6	0,37	0,38	0,36	0,36	0,04	0,05
Etp ha 6	0,11	0,11	0,08	0,1	0,01	0,01
Etp tu 6	0,06	0,07	0,01	0,05	0	0
Etp th 12	0,25	0,35	0,01	0,08	0	0,01
Etp ha 12	0,19	0,2	0,22	0,34	0,02	0,02
Etp tu 12	0,24	0,34	0,01	0,12	0	0
Etp th an	0,35	0,35	0,27	0,29	0,02	0,05
Etp ha an	0,02	0,02	0	0,08	0	0
Etp tu an	0,06	0,09	0,02	0,1	0	0
Bh th 6	0,17	0,19	0,12	0,12	0,03	0,04
Bh ha 6	0,15	0,17	0,09	0,1	0,02	0,03
Bh tu 6	0,13	0,16	0,05	0,05	0,01	0,02
Bh th 12	0,05	0,06	0,12	0,13	0,02	0,02
Bh ha 12	0,03	0,04	0,09	0,1	0,01	0,02
Bh tu 12	0,05	0,06	0,12	0,13	0,02	0,02
Bh th an	0,11	0,11	0,21	0,21	0,03	0,02
Bh ha an	0,08	0,09	0,17	0,17	0,03	0,03
Bh tu an	0,1	0,1	0,19	0,19	0,02	0,03
RUM	0,19	0,2	0,12	0,12	0,16	0,17
RU 5	0,07	0,1	0,05	0,05	0,08	0,08
RU 7	0	0	0	0	0	0
RU 9	0,03	0,03	0	0	0	0
RU 11	0	0	0,1	0,1	0	0,02
DE TOT	0	0,03	0	0	0,02	0,02

Tableau 18. Coefficient de corrélation ( $R^2$ ) entre la fertilité de *Picea abies* (piab), *Fagus sylvatica* (Fasy), et *Quercus petraea* (Qupe), et une sélection des différents indices SIG réalisés.

### 6.3 Caractérisation des étages de végétation à l'aide des indices bioclimatiques (réalisé par l'IFN)

En zone montagneuse, les groupements végétaux sont organisés en étage altitudinaux, appelés étages de végétation, en réponse aux variations des conditions climatiques et majoritairement de la température (Ozenda, 1985). Les limites de ces étages varient à petite échelle selon la latitude et la sécheresse atmosphérique et à grande échelle selon l'exposition et/ou le confinement qui peuvent être traduits par un indice de rayonnement (Becker, 1979). Dans les études de typologie des stations forestières en région montagneuse, les étages de végétation sont une des entrées principales des clefs de détermination.

L'objectif de cette partie du projet est de définir les limites de ces étages de végétation à partir de variables descriptives du milieu disponibles dans la base de données IFN et/ou issues du MNT ou d'autres couches SIG. Le (ou les) modèle(s) ainsi établi devra permettre de classer "automatiquement" les points d'inventaire IFN dans l'étage de végétation qui lui est associé.

Suite à un travail réalisé dans les Alpes du nord dans le cadre du programme national de la typologie des stations forestières de la DGFAR - "Réalisation d'un référentiel écologique régional applicable aux zones montagneuses des départements des Alpes du nord" (Joud, 2006) - 3 283 points lfn ont été classés par l'IFN selon 3 étages de végétation différents : collinéen, montagnard et subalpin. Nous sommes donc repartis de cette classification pour établir un modèle prédictif des étages de végétation.

Dans l'étude de référence, les points lfn ont été classés sur la base de critères d'altitude, d'exposition et à l'aide des relevés floristiques réalisés sur les placettes d'inventaire (Drapier et Cluzeau, 2001). Des groupes d'espèces indicatrices du régime thermique ont été utilisés. La zone d'étude comprenait les départements de l'Ain (01), des Hautes-Alpes (05), de la Drôme (26), de l'Isère (38), de la Savoie (73) et de la Haute-Savoie (74).

La classification s'est opérée en deux temps :

- d'une part réalisation d'une AFC classique des relevés lfn (analyse du tableau floristique actif avec adjonction des données écologiques en variables supplémentaires) et constitution de groupes de relevés homogènes sur les plans thermique, hydrique et trophique par troncature (manuelle) de la CAH (classification ascendante hiérarchique),
- d'autre part réalisation d'une AFC des relevés floristiques de la base floristique des Alpes du nord du Cemagref (BFAN) pour constituer par CAH des groupes d'espèces indicatrices.

La technique AFC – CAH est utilisée classiquement lors de la réalisation de catalogues de stations forestières avec la précaution de ne traiter que des relevés positionnés dans des formations forestières relativement matures et naturelles. C'est pourquoi sur les 7 762 points inventoriés par l'lfn dans les 6 départements de la zone d'étude entre 1995 et 2000, "seuls" 3 283 ont été classés. Les points non classés sont situés dans des peuplements perturbés (reboisements, coupes, etc.), ou correspondent à des peuplements jeunes ou ouverts.

Pour caractériser les étages de végétation précédemment définis dans les Alpes du nord, nous avons procédé à une analyse discriminante linéaire de ces trois étages. Cette analyse a été réalisée sous R en utilisant la procédure « lda » dans la library MASS (Venables & Ripley, 1999).

Parmi les 3 283 points classés par étage de végétation, 281 ont des valeurs manquantes pour certaines des variables descriptives qui nous intéressent. Ces points ont donc été écartés de l'analyse. Nous avons finalement travaillé sur un ensemble de 3 002 points lfn.

L'objectif de l'analyse discriminante est de trouver une ou des fonctions linéaires des variables descriptives qui sépare(nt) au mieux les groupes prédéterminés et de comprendre quelles sont les variables qui expliquent le mieux cette classification. A cette étape descriptive, peut s'ajouter une étape prédictive dans laquelle on utilise la ou les fonction ainsi déterminées pour prédire l'appartenance d'un élément à un groupe connaissant ses valeurs pour les variables de la fonction ou des fonctions discriminantes.

### 6.3.1 Caractéristiques des 3002 points et des 3 étages prédéterminés

Les 3 002 points de la zone d'étude se répartissent en 826 (27,5 %) points dans l'étage collinéen, 1811 (60,3 %) points dans l'étage montagnard et 365 (12,2 %) points dans l'étage subalpin.

Dans les Alpes du nord, l'altitude augmente avec la longitude, ainsi les sommets les plus élevés sont situés à l'est de la chaîne des alpes. Les points classés dans le subalpin sont presque tous situés à l'est.

	Altitudes (m)		
	Moyenne	Ecart-type	Min-max
Collinéen	667	208,4	220-1300
Montagnard	1151	204,7	500-1700
Subalpin	1663	188,2	1300-2330

**Tableau 19** : altitudes moyennes des 3 002 points de la zone d'étude par étage de végétation

Bien qu'ayant une altitude moyenne distincte et séparée de 500 m environ, les trois étages de végétation ont des limites très variables, notamment dans le cas des étages collinéens et montagnards (**Tableau 19 et Figure 29**).

L'exposition seule explique peu ces variations, mis à part vers 200 grades (Sud) où la limite altitudinale entre les étages collinéens et montagnards remonte de 200 m environ (**Figure 30**). Cette remontée autour de 200 grades est plus visible avec les valeurs d'exposition prises sur le terrain qu'avec les données issues du MNT.

Les limites entre étages augmentent avec le rayonnement. Cette tendance est visible avec les valeurs de rayonnement issue du modèle Hélios mais moins avec celles issues de Satmos.

Afin de regarder les effets des facteurs intervenant à petite échelle sur les limites altitudinales des étages de végétation, nous avons mis en regard l'altitude des points étudiés avec l'indice de Gams et avec la latitude. Nous avons utilisé l'indice de Gams spatialisé par le Lerfob (Lebourgeois et Piedallu, 2005). Les limites altitudinales augmentent entre étages avec l'indice de Gams mais ce n'est qu'une tendance pas très nette, surtout entre les étages montagnards et subalpins (**Figure 31**).

A la seule analyse du graphique de l'altitude des points en fonction de leur latitude aucune tendance très nette n'est visible. On devine une augmentation de la limite altitudinale lorsque l'on descend vers le sud.

D'après cette analyse succincte de la variation des limites altitudinales entre étages de végétation, nous retiendrons les 5 variables suivantes pour l'analyse discriminante : l'altitude, le rayonnement, la latitude, la longitude et l'indice de gams.



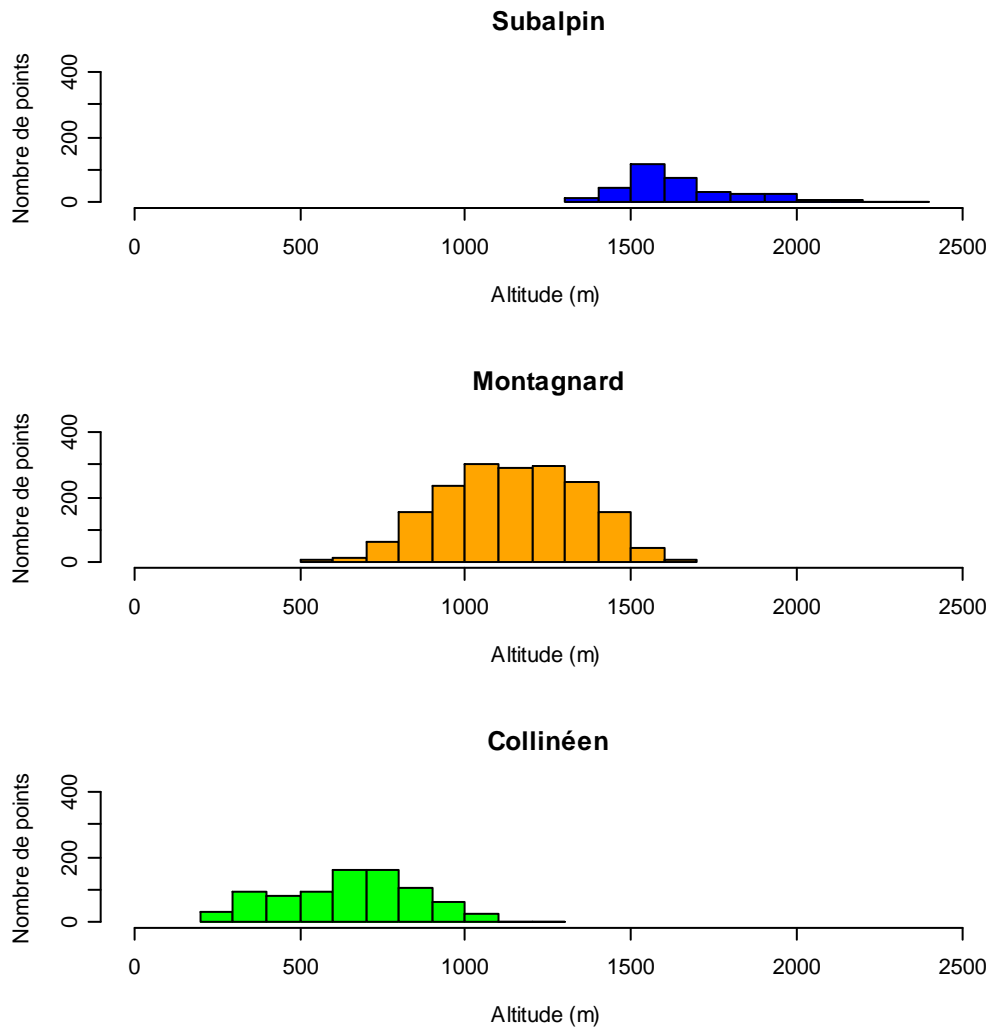
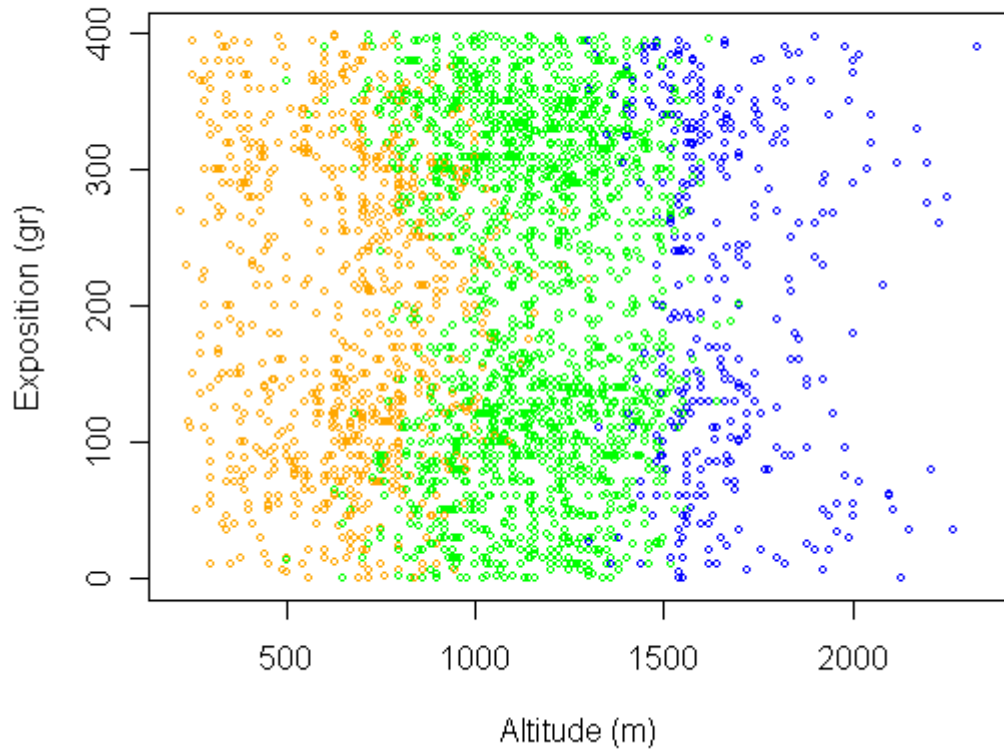
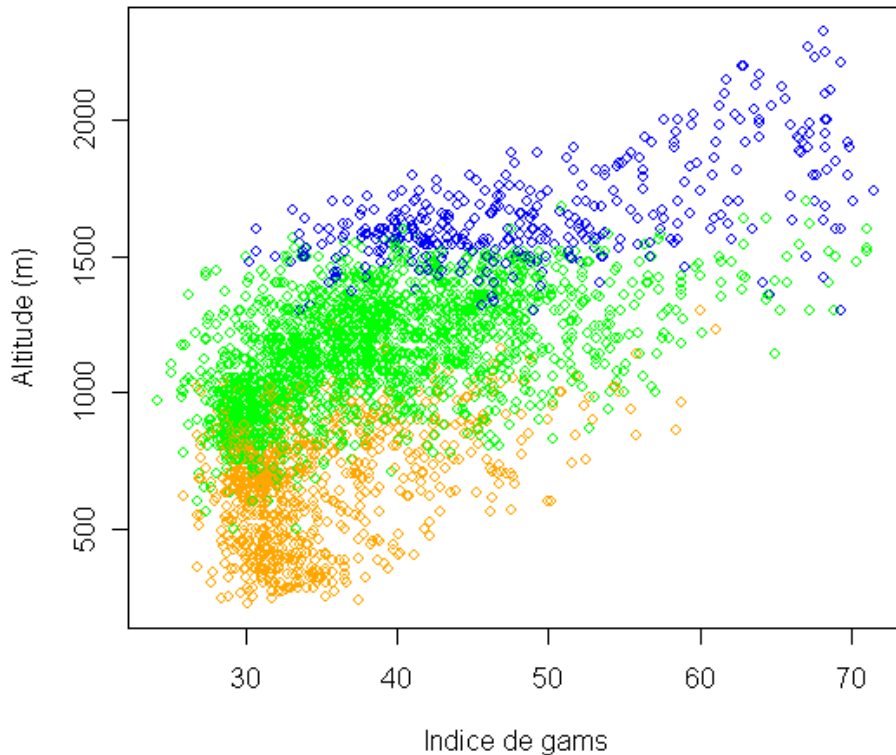


Figure 29 : distribution des altitudes par étage de végétation pour les 3 002 points de la zone d'étude



**Figure 30** : altitude et exposition des 3002 points de la zone d'étude Alpes du nord. Les couleurs correspondent aux étages de végétation selon la classification initiale (orange = collinéen, vert = montagnard et bleu = subalpin).



**Figure 31** : valeurs de l'indice de gams en fonction de l'altitude pour les 3022 points de la zone d'étude Alpes du nord. Les couleurs correspondent aux étages de végétation selon la classification initiale (orange = collinéen, vert = montagnard et bleu = subalpin).

### 6.3.2 Essences principales les plus fréquentes par étage

Sur chacune de ses placettes d'inventaire, l'Ifn définit une essence principale. C'est l'essence qui a le plus fort couvert libre sur la placette de 25 m de rayon (soit 20 ares). Nous avons regardé et comparé la distribution des fréquences par étage des 28 essences principales trouvées sur l'ensemble des 3022 points de la zone d'étude.

Les essences les plus fréquentes dans l'étage collinéen sont le chêne rouvre, le hêtre, l'épicéa commun et le pin sylvestre (**Fig. 32**). Pour l'étage montagnard ce sont l'épicéa commun, le sapin pectiné et le hêtre. Et pour l'étage subalpin, les essences principales les plus fréquentes sont l'épicéa commun, le mélèze d'Europe et le pin à crochets.

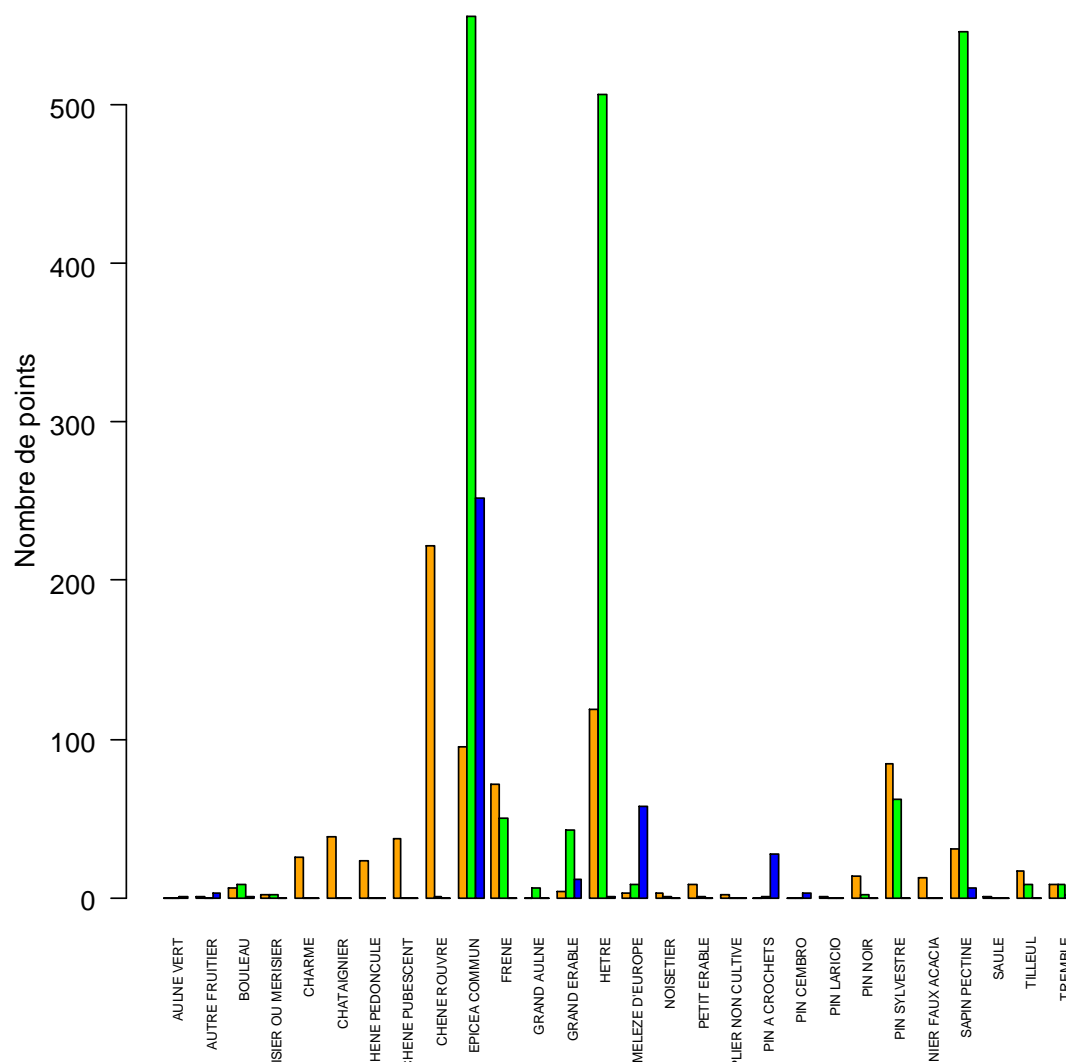


Figure 32 : distribution des points lfn en fonction de leur essence principale et de l'étage de végétation (orange : collinéen, vert : montagnard, bleu : subalpin).

Le chêne rouvre est presque exclusivement présent, en tant qu'essence principale, dans l'étage collinéen, tout comme le pin sylvestre (voir tableau 20). Le hêtre est présent aux étages collinéen et montagnard mais est plus fréquent dans le montagnard. Le sapin pectiné est caractéristique du montagnard. L'épicéa commun est présent dans les 3 étages mais est plus fréquent dans le subalpin. Cet étage est aussi celui du mélèze d'Europe et du pin à crochets.

	<b>Collinéen</b>	<b>Montagnard</b>	<b>Subalpin</b>
Aulne vert			0,3
Autres fruitiers	0,1		0,8
Bouleau	0,7	0,4	0,3
Cerisier ou merisier	0,2	0,1	
Charme	3,0		
Chataîgnier	4,6		
Chêne pédonculé	2,8		
Chêne pubescent	4,5		
Chêne rouvre	26,9	0,1	
Epicéa commun	11,5	30,7	69,0
Frêne	8,6	2,8	
Grand aulne		0,3	
Grand érable	0,5	2,4	3,0
Hêtre	14,4	28,0	0,3
Mélèze d'Europe	0,4	0,4	15,9
Noisetier	0,4	0,1	
Petit érable	1,0	0,1	
Peuplier non cultivé	0,2		
Pin à crochets		0,1	7,4
Pin cembro			0,8
Pin Laricio	0,1		
Pin noir	1,6	0,1	
Pin sylvestre	10,2	3,4	
Robinier faux acacia	1,5		
Sapin pectiné	3,8	30,2	1,6
Saule	0,1		
Tilleul	2,1	0,4	
Tremble	1,0	0,4	0,5

**Tableau 20** : fréquence des essences principales par étage (en % du nombre de points Ifn)

### 6.3.3 Résultats de l'analyse discriminante des étages de végétation

Les 5 variables descriptives suivantes ont donc été utilisées dans l'analyse discriminante : l'altitude, le rayonnement (modèle Hélios), la latitude, la longitude et l'indice de gams.

Plusieurs analyses successives ont été réalisées afin de choisir la fonction discriminante optimale, c'est-à-dire celle qui semblait le mieux expliquer la séparation en trois étages à partir de la combinaison de ces variables descriptives.

Des modèles à 5, puis 4, puis 3, puis 2 variables ont été testés selon toutes les combinaisons de variables possibles parmi les 5 qui ont été retenues. Il ressort de ces tests que c'est avec le modèle combinant l'altitude, le rayonnement et la latitude que l'on obtient le meilleur taux de points bien classés (88,87 %) par rapport à la classification initiale (tableau 3). La proportion de variance inter-groupes expliquée par le premier axe de cette analyse discriminante est de 61,24 %.

Fonction discriminante correspondant au premier axe de l'analyse :  
 $5,297559e-03 * altitude - 3,727619e-04 * rayonnement + 5,119093e-06 * Y$

	<i>Classement a posteriori</i>			
	Collinéen	Montagnard	Subalpin	<i>Total</i>
Collinéen	689	137	0	826
Montagnard	86	1692	33	1811
Subalpin	0	78	287	365
<i>Total</i>	775	1907	320	3002

**Tableau 21** : comparaison des classements initiaux et a posteriori (selon le premier axe de l'analyse)

Bien que ce soit le meilleur modèle obtenu avec les variables utilisées, les trois groupes correspondant aux trois étages ne sont pas complètement séparés dans le plan formé par les deux premiers axes discriminants.

Ni l'indice de Gams, ni la longitude ne jouent un rôle important dans la séparation des trois étages. Ceci est probablement dû aux corrélations de ces variables avec l'altitude.

Ce modèle sera, par la suite, appliqué aux points non encore classés de la zone des Alpes du nord qui a servi à évaluer les indices topographiques issus du MNT, soit environ 15 000 points lfn. Cette application servira à tester la robustesse du modèle et permettra de l'améliorer.

## 7 Conclusion générale

Au cours de ce travail, l'IFN a comparé l'altitude, la pente, l'exposition, et les positions topographiques relevés sur le terrain et calculés sous SIG, a calculé le rayonnement solaire sur les relevés écologiques de l'IFN à l'aide de l'application solar analyst fonctionnant avec ArcGis, et a comparé trois méthodes différentes d'estimation du rayonnement solaire, l'INRA ayant fourni les données satellitaires SATMOS de Météo France. Un essai de caractérisation des étages de végétation a également été réalisé à l'aide de la flore.

L'ENGREF a de son côté élaboré un programme permettant la modélisation multiéchelle du rayonnement solaire, nommé Helios, modèle dont nous avons étudié la sensibilité. Différents indices climatiques ont été calculés sous SIG comme De Martonne, Gams, Emberger, les bilans hydriques climatiques mensuels à partir des estimations de l'ETP selon les formules de Thornthwaite, Turc et Hargreave. La réserve utile maximale des sols a également été cartographiée sur l'ensemble du territoire, après avoir comparé l'intérêt d'utiliser les bases Ecoplant ou IFN, et mis au point la meilleure méthode de calcul de spatialisation en s'étalonnant sur la fertilité de quelques essences. A l'aide des calculs d'ETP et de RUM ainsi réalisés, le bilan hydrique édaphique a pu être calculé et spatialisé mois par mois à l'échelle de la France.

L'ENGREF a également validé le modèle Helios et les méthodes de calcul d'ETP à l'aide de postes de mesures Météo France ou INRA. Les méthodes de calcul d'ETP ont été comparées, mettant en évidence de nombreuses différences sur la France. L'effet du rayonnement solaire calculé avec Helios et des bilans hydriques utilisant les ETP Thornthwaite, Turc et Hargreave a été évalué sur la distribution de la végétation, à travers la prédiction de la distribution d'Acer pseudoplatanus, d'*Abies alba*, et de *Quercus petraea*. L'intérêt d'utiliser à l'échelle de la France des modèles radiatifs prenant en compte la nébulosité par rapport à des indices plus simples a été mis en évidence. La carte de RUM a quant à elle été validée à différentes échelles à l'aide des indices de fertilité de *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, et *Quercus petraea*. Enfin, nous avons testé et comparé un certain nombre des variables calculées, leur pouvoir prédictif vis-à-vis des principaux axes d'une AFC réalisée sur la flore forestière Française et les indices de fertilité de 3 essences ayant été évalués.

Ce projet illustre que les données de l'Ifn sont d'un grand intérêt pour le développement et la spatialisation d'indices bioclimatiques à l'échelle de la France. D'une part, grâce au nombre important de relevés, à leur répartition et à l'homogénéité des protocoles sur tout le territoire et, d'autre part, grâce à la quantité de données analytiques qui sont relevées sur le terrain pour caractériser les conditions stationnelles des peuplements forestiers. De plus, le nombre de relevés s'accroît chaque année depuis 2005 d'environ 7000 points répartis sur l'ensemble du territoire. Il est ainsi possible de suivre l'évolution des conditions de croissance des arbres.

Ce projet a permis à l'Ifn de bénéficier des apports de l'INRA et du Lerfob en matière de spatialisation du rayonnement solaire et de calculs d'indices topographiques sous SIG. Cette collaboration aura pour conséquence pour l'Ifn de compléter sa palette d'indices stationnels et d'affiner certains d'entre eux. On peut d'ores et déjà envisager de futures collaborations sur le calcul et la spatialisation du rayonnement solaire en travaillant sur le couplage des modèles Satmos et Hélios ou encore sur l'amélioration de l'évaluation de la situation topographique en approfondissant l'étude comparée des observations Ifn et du modèle Positopo, encore en développement. Concernant la délimitation des étages de végétation, nous devons tester le modèle obtenu sur l'ensemble des Alpes du nord, ce qui n'a pas pu être fait durant le projet.

Une majorité des indices créés semblent avoir une bonne capacité prédictive vis-à-vis de la flore forestière Française. Par exemple, grâce à eux, on explique 71 % de la variance de l'axe F1 de l'AFC que nous avons réalisée, à l'aide des déficits d'évaporation totaux, ou encore 38% de la variance de

l'indice de fertilité de l'épicéa qui est expliquée par des valeurs d'ETP. Une majorité des indices réalisés ont un effet soit sur la distribution, la fertilité, ou sont corrélés à un des axes de l'AFC.

D'une façon générale, il semble délicat de recommander l'usage de certains indices, aux dépens d'autres, en se basant uniquement sur cette étude. Des travaux complémentaires devront être effectués afin d'approfondir la question, en considérant un nombre plus important d'espèces. En effet, nous constatons que certains indices peuvent être très pertinents dans certains cas et pas du tout dans d'autres. Par exemple, le déficit d'évaporation total est la meilleure des variables testées pour prédire l'axe F1 de l'AFC, mais n'est pas du tout efficace pour prédire la fertilité de *Fagus sylvatica*, *Picea abies* ou *Quercus petraea*. Cela nous amène à se demander si ce sont les mêmes variables qui agissent sur la distribution ou sur la fertilité des essences.

Le rayonnement solaire calculé avec le modèle Helios semble être utile, à la fois utilisé seul, mais aussi et encore plus une fois intégré dans le calcul du bilan hydrique par l'intermédiaire de la formule de Turc. En effet, nous avons montré que ces variables amélioraient les modèles de distribution d'*Acer pseudoplatanus*, d'*Abies alba*, et de *Quercus petraea*, et étaient fortement corrélées à l'axe F1 de l'AFC. Cependant, il s'avère également que les ETP Thornthwaite, dont nous avons démontré qu'elles étaient moins proches de la valeur mesurée, sont des variables ayant un pouvoir prédictif important sur la végétation. Elles sont les meilleurs prédicteurs de l'axe F2 de l'AFC, et des modèles de fertilité de *Picea abies* et *Fagus sylvatica*. Les ETP ou BHC Hargreave, par contre, ne sont pas ressortis parmi les variables les plus explicatives, dans notre étude. Il semblerait donc que les ETP ou les bilans hydriques Turc et Thornthwaite aient la plus forte capacité prédictive vis à vis de la flore forestière Française. Ces résultats nécessitent d'être corroborés par l'étude d'un plus grand nombre d'espèces. Il est difficile d'expliquer pour l'instant pourquoi ces deux méthodes de calcul de l'ETP cohabitent dans les modèles prédictifs. Cependant, il semble que le sens écologique de ces variables soit différent. Sur l'axe F1 de l'AFC, l'ETP la plus explicative, celle de Turc pour le mois de juin, arrive nettement devant celle de Thornthwaite pour la même période ( $R^2$  de 0.53 pour Turc contre 0.37 pour Thornthwaite). Pour l'axe F2, c'est l'inverse, l'ETP Thornthwaite annuelle devançant largement l'ETP Turc de la même période ( $R^2 = 0.53$  contre 0.30). Cette analyse semblerait prouver que l'effet biologique n'est pas le même, l'ETP Turc traduisant plus un degré d'aridité, l'ETP Thornthwaite intégrant quant à lui un effet de continentalité. En attendant une étude plus approfondie, nous conseillons l'usage conjoint des ETP Turc et Thornthwaite dans les modèles.

La spatialisation des RUM et le calcul des bilans hydriques édaphiques permet de franchir une étape dans le calcul du bilan hydrique. On s'aperçoit que la RUM a une capacité prédictive relativement élevée vis à vis de la fertilité de *Picea abies*, *Fagus sylvatica* et *Quercus petraea* (respectivement un  $R^2$  de 0.19, 0.12, et 0.16). Pour *Quercus petraea*, la RUM est même la variable la plus explicative de toutes celles que nous avons testées, devançant très largement les variables climatiques. Le déficit d'évaporation total (DETOT) est quant à lui la variable la plus explicative de l'axe F1 de l'AFC parmi celles testées. Les variables liées au calcul du bilan hydrique édaphique semblent être efficaces pour améliorer les modèles existants. Cependant, il faut pondérer cette analyse en soulignant la faible pertinence des RU mensuelles dans les modèles, hormis pour la fertilité de *Quercus petraea* où RU5 est la deuxième variable la plus explicative parmi celles testées. Le calcul du bilan hydrique édaphique permet de créer un grand nombre de variables, et il s'avère nécessaire d'étudier précisément la capacité prédictive de chacune d'entre elles. Nous n'avons pas pris en compte par exemple l'effet des ETR ou des déficits d'évaporation mensuels. D'autre part, l'effet de variables synthétiques intégrant le stock d'eau disponible dans l'année comme DETOT semble pertinent, et d'autres variables comme la RU moyenne, ou le déficit d'évaporation maximal seraient à tester. En outre, la méthode de calcul du bilan hydrique nécessite quelques améliorations.

La cartographie sous SIG d'indices bioclimatiques représente un grand pas en avant vers la mise à disposition d'informations fines à travers l'ensemble du territoire. Ces données permettent à la fois de modéliser la distribution ou la fertilité des essences, mais encore de caractériser le type de station



forestière de façon uniforme sur l'ensemble du territoire. La prise en compte de la topographie dans les calculs permet un travail à fine résolution, compatible avec une utilisation des données à l'échelle de la forêt. L'accès à des données quantifiant la capacité de rétention de l'eau dans le sol permet de produire des indices synthétiques intégrant climat et sol. Dans le contexte actuel de changement climatique, ces indices pourront être utilisés pour étudier la sensibilité des stations au changement climatique ou à évaluer l'impact potentiel du réchauffement sur les essences ou les stations forestières présentes en France.

### **Quelques références bibliographiques**

- Aussenac, G. and Granier, A., 1979. Etude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus sylvatica* L et *Quercus sessiliflora* Salisb) de l'Est de la France. Etude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Annales des Sciences Forestières*, 36(4): 265-280.
- Austin, M.P., Nicholls, A.O. Margules, C.R., 1990. Measurement of the realised qualitative niche: Environmental niches of five *Eucalyptus* species. *Ecological Monographs* 60(2), 161-177.
- Baize, D. Jabiol, B., 1995. Guide pour la description des sols.
- Becker, M., 1979. Indices de climat lumineux combinant pente et exposition. *Bulletin d'écologie* 10, 2, 125-137.
- Benichou, P. Le Breton, O., 1987a. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie* 7(19): 23-24.
- Benichou, P. Le Breton, O., 1987b. Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques. *La Météorologie* 7ème série, n°19, 12.
- Bravo-Oviedo, A. Montero, G., 2005. Site index in relation to edaphic variables in stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in south west Spain. *Annals of Forest Science* 62(1), 61-72.
- Brisse, H., de Ruffray, P., Grandjouan, G. Hoff, M., 1995. European vegetation survey. The phytosociological database "Sophy". Part 1. Calibration of indicator plants. Part 2. Socio-ecological classification of the relevés. *Annali di botanica* 53, 177-223.
- Brown, D.G., 1994. Predicting vegetation types at treeline using topography and biophysical disturbance variables. *Journal of Vegetation Science* 5, 641-656.
- Bruand, A. et al., 2002. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : utilisation de classe de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Etude et gestion des sols* 9(2), 105-125.
- Campbell, G.S., 1981. Fundamentals of radiation and temperature relations. In: P.S. O.L. Lange, Nobel, C.B. Osmond and H. Ziegler (Editor), *Physiological plant ecology I: Responses to the physical Environment*. Encyclopedia of plant physiology 12A. Springer New York, pp. 11-40.
- Carroll, C., Zielinski, W.J. Noss, R.F., 1999. Using presence-absence data to build and test spatial habitat models for the Fisher in the Klamath region, U.S.A. *Conservation Biology* 13(6), 1344-1359.
- Choisnel, E., 1992. Climat : notions de climatologie, climat régional, topoclimat, microclimat. *Techniques Agricoles*(1050): 1-14.
- Clark, D.B., Palmer, M.W. Clark, D.A., 1999. Edaphic factors and the landscape-scale distributions of tropical rain forest trees. *Ecology* 80(8), 2662-2675.
- Coops, N.C. Waring, R.H., 2001. Estimating forest productivity in the eastern Siskiyou Mountains of southwestern Oregon using a satellite driven process model, 3-PGS. *Canadian Journal of Forest Research Journal Canadien de la Recherche Forestiere* 31(1), 143-154.
- Cornelis, W.M., Ronsyn, J., Meirvenne, M.v. Hartmann, R., 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal* 65(3), 638-648.
- Coudun, C. Gégout, J.C., 2005. Quantitative prediction of the distribution and abundance of *Vaccinium myrtillus* (L) with climatic and edaphic factors in french forests, 48th IAVS Symposium, Lisbonne, pp. 1-19.
- Coudun, C., Gégout, J.C., Piedallu, C. Rameau, J.C., 2006. Soil nutritional factors improve models of plant species distribution: an illustration with *Acer campestre* (L.) in France. *Journal of Biogeography*.
- De Martonne, E., 1926. Aréisme et indice d'aridité. *Compte rendu Académie des Sciences*, 181: 1395-1398.
- Dirnböck, T. Dullinger, S., 2004. Habitat distribution models, spatial autocorrelation, functional traits and dispersal capacity of alpine plant species. *Journal of Vegetation Science* 15(1), 77-84.

- Dirnbock, T., Dullinger, S., Gottfried, M., Ginzler, C. Grabherr, G., 2003. Mapping alpine vegetation based on image analysis, topographic variables and Canonical Correspondance Analysis. *Applied Vegetation Science* 6, 85-96.
- Dozier J. & Strahler A.H., 1983. Ground investigations in support of remote sensing. In Colwell R.N. (ed.) *Manual of Remote Sensing*, vol.1, Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Drapier J., Cluzeau C., 2001. La base de données écologiques de l'IFN. *In*: Actes du séminaire IFN 2000 "Collecte et utilisation des données forestières". *Revue forestière française*, vol. LIII, n° 3-4, 2001, p. 365-371.
- Droogers, P. and Allen, R., 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16: 33-45.
- Dubayah, R. Loechel, S., 1997. Modeling topographic solar radiation using GOES data. *Journal of Applied Meteorology* 36(2), 141-154.
- Durner, W. Zipprich, M., 2002. Estimating available water capacity from basic soil physical properties. A comparison of common pedotransfer functions, Kai Lipsius.
- Ebener, S., 1999. Utilisation d'un SIG en mode raster pour la spatialisation du bilan hydrique à l'échelle mensuelle, Geneve, 311 + annexes pp.
- Engler, R., Guisan, A. Rechsteiner, L., 2004. An improved approach for predicting the distribution of rare and endangered species from occurrence and pseudo-absence data. *Journal of Applied Ecology* 41(2), 263-274.
- Federer, C.A., Vörösmarty, C. and Fekete, B., 1996. Intercomparison of methods for calculating potential evaporation in regional and global water balance models. *Water Resources Research*, 32(7): 2315-2321.
- Franklin, J., 1995. Predictive vegetation mapping: Geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography* 19, 474-499.
- Gates, D.M. (Editor), 1980. *Biophysical ecology*, New York, 603 p. pp.
- Gégout, J.C., Coudun, C., Bailly, G. Jabiol, B., 2005. EcoPlant: a forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *Journal of Vegetation Science* 16(2), 257-260.
- Gégout, J.C., Piedallu, C. Cornu, J.F., 2006. Cartographie prédictive des stations forestières du massif Vosgien. *In*: ECOFOR (Editor), *Forêt, vent et risque : des connaissances enrichies pour une meilleure gestion forestière*.
- Givi, J., Prasher, S.O. Patel, R.M., 2004. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. *Agricultural Water Management* 70(2), 83-96.
- Granier, A., Bréda, N., Claustres, J.P. and Colin, F., 1989. Variation of hydraulic conductance of some adult conifers under natural conditions. *Annales des Sciences Forestières*, 46 (suppl): 357-360.
- Guisan, A. Theurillat, J.-P., 2000. Equilibrium modeling of alpine plant distribution and climate change: How far can we go? *Phytocoenologia* 30(3-4), 353-384.
- Guisan, A., Theurillat, J.P. Kienast, F., 1998. predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment. *Journal of vegetation science* 9, 65-74.
- Hetrick, W.A., Rich, P.M., Barnes, F.J. Weiss, S.B., 1993. GIS based solar radiation flux models. *American Society for photogrammetry and remote sensing technical papers vol 3 GIS photogrammetry and modelling*, pp123-143.
- Hofierka, J. Suri, M., 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications (2002), *Open source GIS - GRASS User conference 2002*, trento, Italy.
- Holdridge, L.R., 1947. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science* 105, 367-368.
- Horn B.K.P, 1981. Hill shading and the reflectance map. *In Proceedings of the IEEE*, 69, 14-47.
- Jamagne, M., Betremieux, R., Begon, J.C. Mori, A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *agro - INRA* 127, 627-641.
- Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B. and Allen, R.G., 1997. Computation of ETo under nonideal conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(5): 394-435.

- Joud D., 2006. Synthèse pour les Alpes du Nord et les montagnes de l'Ain. Guides techniques du CRPF Rhône-Alpes, septembre 2006.
- Kasten, F. Czeplak, G., 1980. Solar and terrestrial radiation dependent of the amount and type of cloud. *Solar energy* 24, 177-189.
- Kreith, F. Kreider, J.F., 1978. Principles of solar engineering. Hemisphere Publishing Corp, Washington, D.C., 790 pp.
- Kumar, L., Skidmore, A.K. Knowles, E., 1997. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science* 11, 475-497.
- Lebourgeois, F., Differt, J., Granier, A., Bréda, N. and Ulrich, E., 2002. Premières observations phénologiques des peuplements du réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers (RENECOFOR). *Revue Forestière Française*, 54(5): 407-418.
- Lebourgeois, F. and Piedallu, C., 2005. Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière. Notions d'indices bioclimatiques. *Revue Forestière Française*, 57(3): 331-356.
- Lehmann, A., Leathwick, J.R. Overton, J.M., 2002. Assessing New Zealand fern diversity from spatial predictions of species assemblages. *Biodiversity & Conservation* 11(12), 2217-2238.
- List, R.J., 1984. Smithsonian Meteorological Tables, 6th rev. ed. Smithsonian Institution, Washington DC, USA, 539 pp.
- Liu, B.Y. Jordan, R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 4(3), 1-19.
- McCullagh, P. Nelder, J.A., 1997. Generalized linear models. Monographs on Statistics and Applied Probability, 37. Chapman & Hall, London, UK, 511 pp.
- Michalet, R., 1991. Nouvelle synthèse bioclimatique des milieux méditerranéens. Application au Maroc septentrional. *Revue d'Ecologie Alpine*, 1: 60-80.
- Miller, J. Franklin, J., 2002. Modeling the distribution of four vegetation alliances using generalized linear models and classification trees with spatial dependence. *Ecological Modelling* 157(2-3), 227-247.
- Mitsuda, Y., Ito, S. Sakamoto, S., 2007. Predicting the site index of sugi plantations from GIS-derived environmental factors in Miyazaki Prefecture. *Journal of Forest Research*.
- Moser, D. et al., 2005. Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps. *Journal of Biogeography* 32(7), 1117-1127.
- Nemes, A., Schaap, M.G. Wosten, J.H.M., 2003. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Science Society of America Journal* 67(4), 1093-1102.
- Nemes, A., Wosten, J.H.M., Bouma, J. and Varallyay, G., 2006. Soil water balance scenario studies using predicted soil hydraulic parameters. *Hydrological Processes*, 20(5): 1075-1094.
- Ohmann, J.L. Gregory, M.J., 2002. Predictive mapping of forest composition and structure with direct gradient analysis and nearest-neighbor imputation in coastal Oregon, USA. *Canadian Journal of Forest Research* 32(4), 725-741.
- Oke, T.R., 1987. Boundary layer climates, 2nd ed., Methuen, N.Y.
- Orfanus, T. Mikulec, V., 2005. Regionalization of potential water storage capacity of agricultural landscape - a quantification of soil accumulation function. *Geophysical Research Abstracts* 7(01119).
- Ozenda, 1985. La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard européen. Paris : Masson, 385p.
- Piedallu, C. Gégout, J.C., 2007. Multiscale computation of solar radiation for predictive vegetation modelling. *Annals of Forest Science*, in press.
- Piedallu, C., Gégout, J.C., Cornu, J.F. Cluzeau, C., 2006. Cartographie prédictive des stations forestières du massif vosgien, élaboration, validation et applications, ENGREF.
- Pierce, K.B., Lookingbill, T. Urban, D., 2005. A simple method for estimating potential relative radiation (PRR) for landscape-scale vegetation analysis. *Landscape Ecology* 20(2), 137-147.

- Pinto, P.E. Gegout, J.C., 2005. Assessing the nutritional and climatic response of temperate tree species in the Vosges Mountains. *Annals of Forest Science* 62(7), 761-770.
- Pontailleur, J.Y., Nizinski, J. and Saugier, B., 1988. Bilan de l'eau et évapotranspiration de forêts de feuillues. In " Etudes sur les transferts d'eau dans le système sol-plante-atmosphère" , R. Calvet (Editeur) - INRA, 362 pages: 329-355.
- Prentice, I.C. et al., 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography* 19, 117-134.
- Rameau, J.C., Mansion, D. Dumé, G., 1993. Flore forestière française - guide écologique illustré - tome 2 : montagnes. Institut pour le Développement, Paris, 2421 pp.
- Rawls, W.J., Pachepsky, Y. Shen, M.H., 2001. Testing soil water retention estimation with the MUUF pedotransfer model using data from the southern United States. *Journal of Hydrology* 251(3-4), 177-185.
- Romano, N. Santini, A., 1997. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. *Journal of Hydrology* 202(1-4), 137-157.
- Schaap, M.G., Leij, F.J. van Genuchten, M.T., 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251(3-4), 163-176.
- Seynave, I. et al., 2004a. Etude des potentialités forestières pour l'épicéa commun dans l'Est de la France à partir des données de l'IFN. *Revue forestière Française* LVI(6), 537-550.
- Seynave, I. et al., 2004b. Picea abies site index prediction by environmental factors and understorey vegetation : a two-scale approach based on survey databases.
- Sharpnack D.A. & Akin G., 1969. An algorithm for computing slope and aspect from elevation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 35, 247p.
- Tappeiner, U., Tasser, E. Tappeiner, G., 1998. Modelling vegetation patterns using natural and anthropogenic influence factors: preliminary experience with a GIS based model applied to an Alpine area. *Ecological Modelling* 113(1-3), 225-237.
- Thorntwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38: 55-94.
- Thuiller, W. et al., 2003. Large-scale environmental correlates of forest tree distributions in Catalonia (NE Spain). *Global Ecology and Biogeography* 12(4), 313-325.
- Turc, L., 1955. Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement. *Annales Agronomiques*, 6(1): 1-131.
- Turc, L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12(1): 13-49.
- Van Alphen, B.J., Bootink, H.W.G. Bouma, J., 2001. Combining pedotransfer functions with physical measurements to improve the estimation of soil hydraulic properties. *Geoderma* 103(1/2).
- van Genuchten, M.T., A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- Vanderlinden, K., Giraldez, J.V. Van Meirvenne, M., 2005. Soil water-holding capacity assessment in terms of the average annual water balance in Southern Spain. *Vadose Zone Journal* 4(2), 317-328.
- Venables W. N., Ripley B. D., 1999. *Modern Applied Statistics with S-Plus – 3<sup>rd</sup> edition – Springer ed.* -
- Vincke, C. Delvaux, B., 2005. Porosity and available water of temporarily waterlogged soils in a Quercus robur (L.) declining stand. *Plant and Soil* 271(1-2), 189-203.
- Wagner, B. et al., 2001. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma* 102(3/4), 275-297.
- Wilson, J.P. Gallant, J.C., 2000. *Terrain analysis, principles and applications.* John Wiley and sons,, 479 pp.
- Winter, T.C., Rosenberry, D.O. and Sturrock, A.M., 1995. Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the north central united states. *Water Resources Research*, 31(4): 983-993.

- Wosten, J.H.M., Finke, P.A. Jansen, M.J.W., 1995. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. *Geoderma* 66(3-4), 227-237.
- Wosten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. Bas, C.I., 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90(3/4).
- Zevenbergen L.W. & Thorne C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1), 47-56.
- Zheng, D., Hunt, E.R. Running, S.W., 1996. Comparison of available soil water capacity estimated from topography and soil series information. *Landscape Ecology* 11(1), 3-14.
- Zimmermann, N.E. Kienast, F., 1999. Predictive mapping of alpine grasslands in Switzerland: Species versus community approach. *Journal of Vegetation Science* 10(4), 469-482.