

Etude financée par le
Ministère de l'Agriculture,
de la Pêche et de l'Alimentation - DERF



Département Gestion des territoires
Division Agriculture et Forêt Méditerranéennes

Etude des potentialités forestières de la Provence calcaire

Evaluation à petite échelle sur de grandes surfaces

Présentation résumée

Mars 2001

Michel VENNETIER - Christian RIPERT - Eric MAILLE,

**Avec la collaboration de Laurence BLANC
pour les analyses statistiques**

et de

**Fabien BROCHIERO, Olivier CHANDIOUX, Roland ESTEVE,
Nassim GADIRI, Yaacoub NASSIF, Cyrille RATHGEBER**

GROUPEMENT D'AIX EN PROVENCE

Le Tholonet - BP 31

13612 Aix-en-Provence Cedex 01

Tél.: 42.66.99.62 - Fax : 42.66.99.

Résumé

Etude des Potentialités forestières de la Provence calcaire

Nous proposons dans cette étude une méthode d'analyse des potentialités forestières du milieu naturel adaptée au contexte méditerranéen. Cette méthode, basée sur des modèles statistiques, permet de travailler à plusieurs échelles emboîtées :

> sur la base de variables régionalisées essentiellement géographiques et climatiques, elle débouche sur une carte d'indices de potentialités à l'échelle de la Provence calcaire (700 000 ha), qui peut être détaillée en restant fiable à des échelles beaucoup plus fines adaptées à l'aménagement des massifs forestiers (précision d'ordre hectométrique).

> un modèle prenant en compte les principales variables topographiques et édaphiques permet d'ajuster l'indice général à l'échelle de la gestion forestière et de définir la potentialité locale des stations forestières (précision d'ordre décamétrique).

L'intégration des modèles généraux et locaux permet aux gestionnaires de conserver la même grille de référence sur l'ensemble des forêts de la zone d'étude, et donc de comparer objectivement des sites éloignés et très différents.

La correspondance entre les indices de potentialité développés dans cette étude et la croissance des principales espèces forestières est précisée : une clef permet de déterminer la liste des espèces forestières adaptées à chaque site et le niveau de productivité de chacune d'elles.

Les forestiers de terrain disposent donc maintenant d'un outil d'évaluation stationnelle fonctionnel et homogène sur l'ensemble de la zone d'étude, combinant les avantages des typologies de stations forestières et des études autécologiques.

Les indices de potentialités rendent compte du bilan hydrique stationnel. L'eau étant le principal facteur limitant de la fertilité en région méditerranéenne, ces indices expliquent une grande partie des variations observées dans la composition de la végétation.

1. PRESENTATION DE L'ETUDE

1.1. Contexte

En régions méditerranéennes françaises, et particulièrement en région PACA, la surface couverte par les catalogues de stations forestières est très inférieure à la moyenne nationale.

Les méthodes classiques de typologie de stations forestières, basées en partie ou totalement sur la phytosociologie, n'y sont pas adaptées. En effet, la flore forestière est perturbée par les incendies, le pâturage ou le débroussaillage, et les forêts sont majoritairement d'origine très récente, issues de la déprise agricole et pastorale. La végétation y est le plus souvent en évolution rapide et n'est pas en équilibre avec le milieu.

D'autre part, il est impossible dans la plupart des cas d'extrapoler un catalogue hors de sa zone d'étude, généralement restreinte ; et il est aussi difficile de faire la synthèse de deux catalogues de régions voisines, les stations définies par l'un étant rarement comparables à celles de l'autre.

Pour les forestiers, le lien n'est pas toujours fait entre les stations d'un catalogue et la productivité potentielle des différentes espèces d'arbres (jamais de façon précise en zone médit).

C'est pourquoi il est apparu nécessaire à l'échelle régionale de chercher une nouvelle méthode de description et d'analyse du milieu naturel :

- permettant l'évaluation des potentialités forestières,
- plus rapide à mettre en œuvre que les catalogues classiques de stations forestières,
- donnant des résultats homogènes et extrapolables à l'échelle régionale,
- et permettant la cartographie de ses résultats.

1.2. Hypothèses

L'hypothèse de base est que **le bilan hydrique joue un rôle prédominant** pour la potentialité forestière en zone méditerranéenne, où il constitue le principal facteur limitant.

La deuxième hypothèse classique est que **la flore est une très bonne indicatrice du milieu quand elle est en équilibre**. La flore doit donc faire apparaître le bilan hydrique.

Nous n'avons retenu pour les relevés que **les sites les moins perturbés, de forêts "anciennes" et d'âge en moyenne assez élevé**. Nous avons fait l'hypothèse que la flore y était représentative des potentialités du milieu (donc du bilan hydrique), en raison de l'ancienneté du couvert forestier qui a permis à la végétation d'atteindre un certain équilibre dans sa composition.

1.3. Bases de la modélisation

A un niveau de bilan hydrique donné correspond une végétation potentielle, atteinte dans les forêts anciennes, ayant une composition et une vigueur données.

On peut, par des analyses statistiques multidimensionnelles, classer les placettes et les plantes observées dans un gradient de bilan hydrique, ce dernier comme facteur dominant devant logiquement ressortir clairement des analyses. En partant de ce classement, on détermine pour chaque placette d'inventaire un **indice floristique** (indice que l'on peut interpréter comme un indice de bilan hydrique), calculé objectivement à partir de la flore.

On peut aussi rapporter la plupart des facteurs physiques du milieu à leur rôle dans le bilan hydrique. Le but de l'étude est alors de trouver un modèle de l'indice floristique (indice de potentialités), calculé à l'aide des seuls facteurs physiques du milieu. Lorsque le modèle est au point, il permet de reproduire assez fidèlement l'indice floristique. On peut alors s'en servir, quel que soit l'état de dégradation des peuplements et de la végétation et même en absence de toute végétation, pour déterminer l'indice représentatif des potentialités d'un site.

Le modèle est calculé à deux niveaux de précision :

- Lorsque le modèle n'utilise que les macro-facteurs, pour lesquels existent des bases de données régionales géoréférencées (cartes climatiques, données géographiques ou géologiques, exposition, petites régions naturelles ...), on peut réaliser une cartographie automatique d'un indice de potentialités de base, avec un SIG (Système d'Information Géographique), sur de grandes surfaces.
- Pour un projet plus précis, on utilise un modèle complet intégrant les variables locales qui ne sont observables que sur le terrain.

1.4. Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage est basé sur le croisement de 4 facteurs principaux dont les études précédentes ont montré le rôle important. Il s'agit du substrat (*roche et matériau superficiel*), du secteur climatique (2 classes : *basse Provence et arrière pays méditerranéen*), de l'altitude (4 classes de 200 m d'amplitude) et de l'exposition (*Indice de climat lumineux de Becker -IKR-* ; 3 classes : *stations froides, neutres, chaudes*).

Plusieurs autres variables ont été prises en compte autant que possible pour équilibrer l'échantillon : la répartition géographique homogène des placettes, la situation topographique, la profondeur du sol. (transparent de la zone d'étude)

Au total, 325 placettes de 400 à 500 m² ont été réalisées dans cet objectif sur la zone d'étude

2. VARIABLES ABIOTIQUES UTILISEES POUR LES MODELES

2.1. Types de variables utilisés

Les modèles que nous avons développés s'appuient sur des combinaisons de variables abiotiques, traduisant l'environnement de la flore (des placettes).

Ces variables, issues de la feuille de relevé de terrain ou calculées ultérieurement, peuvent être classées en plusieurs groupes :

- un premier groupe de variables globales régionalisables (macro-facteurs) =>
 - variables géographiques : altitudes, distances à la mer, continentalité,
 - variables climatiques (températures, pluies),
 - variables d'exposition (exposition stationnelle, ikr, confinement),
- un deuxième groupe de variables locales =>
 - variables topographiques, à l'échelle locales de la station et à l'échelle du versant,
 - variables géologiques (roche, pendage, fissuration, stratification, ...),
 - variables pédologiques (horizons, matériau, texture, profondeur, % cailloux, test tarière, ...),
 - variables anthropiques (degré d'anthropisation).

Le premier groupe est utilisé pour les modèles à l'échelle de la zone d'étude.

Le deuxième groupe est utilisé en combinaison avec le premier :

- ❖ pour un modèle complet et précis à l'échelle stationnelle,
- ❖ pour un outil pratique d'évaluation des potentialités forestières, destiné aux forestiers de terrain.

La plupart des variables sont relevées sur le terrain ou sur carte lors des mesures sur les placettes.

2.2. Variables calculées

2.2.1. Variables géographiques

Il existait dans la zone d'étude des gradients forts d'ordre climatique. Deux gradients principaux sont observés :

- du sud vers le nord, suivant la distance à la mer, un gradient de température et de pluie que l'on peut assimiler en première approche à un gradient de continentalité.
- de l'Ouest vers l'Est, avec un gradient pluviométrique fort entre Provence plus sèche et côte d'Azur plus humide (donner exemples Istre, Côte d'Azur).

Ces deux gradients sont perturbés par la présence de massifs montagneux proches de la mer, orientés grossièrement Est-Ouest et faisant barrière aux influences maritimes dans la partie Est du domaine d'étude. Cet effet de barrière thermique s'accompagne d'un effet localisé d'accroissement de la nébulosité et des pluies. Il crée des pôles de "continentalité" forte à proximité de la mer. Il en résulte globalement une forte corrélation entre géographie et climat. Ces relations sont traduites dans le découpage des petites régions naturelles du Cemagref.

Deux types de variables ont été retenus pour exprimer ensemble la continentalité :

- l'altitude du masque à la mer, égale à l'altitude du relief le plus élevé séparant un point de la mer, dans une direction donnée,
- la distance à la mer dans cette même direction.

Elles sont ensuite utilisées soit comme variables séparées, soit pour construire une variable synthétique appelée indice de continentalité.

2.2.2. Exposition

L'exposition exprime mal le climat lumineux d'un versant, car celui-ci dépend beaucoup de la pente. C'est pourquoi nous utilisons de préférence l'ikr, indice de climat lumineux de Becker, qui combine exposition et pente pour exprimer l'énergie lumineuse effectivement reçue par unité de surface sur une portion donnée de versant

2.2.3. Variables climatiques

Nous disposons d'une base de données climatique (compilée par le CRPF) Nous avons procédé à des interpolations statistiques à l'aide du SIG Arc-info.

3. CALCUL DES INDICES FLORISTIQUES

3.1. Approche statistique du bilan hydrique

3.1.1. Bases floristiques et statistiques du modèle

La détermination d'un indice floristique utilise l'analyse factorielle des correspondances (AFC) avec les placettes comme observations et les plantes comme variables. Cette approche est couramment pratiquée en phytosociologie.

Elle permet de mettre en relation des groupes de plantes ayant des affinités communes pour certains types de milieux, les placettes représentatives de ces milieux, et les variables explicatives de ces milieux qui sont introduites secondairement dans l'analyse.

Les axes factoriels principaux peuvent être interprétés à partir des classes de variables qui leurs sont liés. Des gradients apparaissent dans la répartition des classes de variables, qui permettent une bonne lisibilité des plans factoriels.

Dans notre cas, l'hypothèse de base était que le bilan hydrique est prépondérant dans la répartition de la flore. Il devait donc pouvoir se retrouver sur les premiers axes factoriels.

3.1.2. Interprétation des axes factoriels par les variables abiotiques

On remarque très clairement plusieurs gradients qui tous concourent au bilan hydrique :

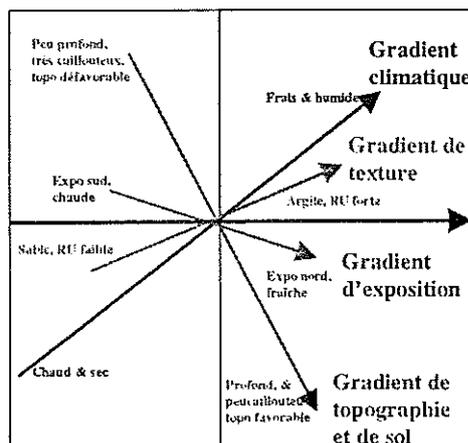
- gradient climatique et géographique: température, pluie et continentalité,
- gradient de texture du sol : sable/argile et réserve utile (RU),
- gradient d'exposition : chaude / fraîche, confinement
- gradient de topographie, et de qualité du sol (Topographie générale et stationnelle, profondeur de sol, % éléments grossiers, affleurements rocheux,

AFC
de base

Figure 2 : Interprétation du plan 1-2 de l'AFC

On a 4 gradients concordants allant :

- de la gauche (niveau le plus chaud et/ou le plus sec)
- vers la droite (niveau le plus frais et/ou le plus humide)



axe1 : résultante des 4 gradients
BILAN HYDRIQUE GLOBAL

Conformément aux études précédentes et à nos hypothèses de départ, le bilan hydrique s'avère le facteur le plus puissant de structuration de la flore.

Ces quatre gradients sont symétriques par rapport à l'axe 1. La résultante de l'ensemble des variables est clairement le bilan hydrique global, et se confond avec l'axe 1. La concordance de tous les gradients, et la prédominance de l'axe 1 dans l'analyse, confirment que le bilan hydrique est bien l'élément clef de la composition floristique dans notre zone d'étude, et valident notre hypothèse de départ.

3.2. *Contrôle de la robustesse de notre approche statistique*

La flore étant à la base de nos modèles, nous avons testé la robustesse statistique de notre approche avant de poursuivre plus loin la modélisation. Notre modélisation utilisant les deux premiers axes factoriels de l'AFC, et les coordonnées des plantes et placettes sur ces axes, nous avons vérifié la stabilité des axes et des coordonnées suivant différents scénarios.

Deux questions se posaient quand à cette robustesse :

- le nombre minimal d'occurrences en deçà duquel une plante est éliminée, c'est à dire concrètement le nombre de plantes retenues pour l'analyse,
- le mode de codage de l'abondance des plantes, l'analyse pouvant théoriquement être sensible à ce paramètre.

Nous avons, pour résoudre cette question, utilisé l'analyse factorielle multiple (AFM). Cette méthode permet de représenter et de mesurer la convergence ou la divergence d'individus-placettes lorsqu'ils sont "vus" à travers différents groupes de variables, ainsi que la stabilité des axes factoriels de l'analyse en fonction des groupes de variables utilisés.

Dans notre cas, nous avons utilisé 3 groupes de variables pour chaque analyse (chaque plante est une variable) :

- pour l'analyse du nombre d'occurrences, les groupes de variables correspondent aux trois groupes de plantes obtenus par tri sur les limites de 3, 10 et 25 occurrences.
- pour l'analyse des codages, les 179 plantes d'occurrence supérieure ou égale à trois ont été codées suivant 3 méthodes donnant les trois groupes de variables : codage en abondance-dominance (méthode Braun-Blanquet), codage en présence/absence, et codage réduit intermédiaire entre les deux premiers.

Il en ressort que le plan des deux principaux axes factoriels et les coordonnées des plantes et placettes sur ces axes sont extrêmement stables, quel que soit le codage utilisé.

De même, il faut dépasser une limite d'occurrence de 25, c'est à dire éliminer :

- plus de 75% des plantes présentes au moins 1 fois
 - plus de 50% des plantes présentes au moins 3 fois,
- pour que des effets significatifs apparaissent sur les axes et les coordonnées, donc sur la construction du modèle.

Notre projet de modélisation est donc très robuste vis à vis des facteurs humains et des conditions de travail qui pourraient faire varier légèrement la notation de la flore et la liste des espèces.

Cela signifie que le bilan hydrique est un facteur hyper dominant et que le facteur de structuration suivant est très loin derrière.

Nous avons par la suite retenu une limite d'occurrence de 3 et le codage en abondance-dominance.

3.3. *Calcul des indices floristiques*

Les indices floristiques sont calculés pour chaque placette de relevé. Par construction mathématique des plans de l'AFC, chaque placette est située au centre de gravité des plantes présentes sur cette placette. Les plantes sont supposées représentatives des situations climatiques et topo-édaphiques ; la position moyenne des plantes présentes sur une placette, donc les coordonnées de cette placette, doivent représenter la position relative de la placette dans les gradients.

L'opération consiste à projeter orthogonalement les points représentant les placettes sur les droites représentant les gradients. Les projections des placettes se positionnent dans un ordre qui doit représenter leur classement dans le gradient.

Nous disposons ainsi d'indices floristiques (indflo_*), correspondant aux coordonnées des projections des placettes :

- sur l'axe 1 de l'AFC : Indflo_glob
- sur la droite de gradient climatique : Indflo_clim
- sur la droite de gradient topo-édaphique : Indflo_TE

Le travail consiste à trouver des modèles, construits avec les seules variables abiotiques, qui prédisent au mieux les indices floristiques.

4. Modélisation et cartographie

4.1. Choix des modèles

Le bilan hydrique stationnel exprimé par l'indice floristique est un phénomène complexe, qui résulte de l'action conjuguée d'un nombre important de facteurs abiotiques, certains d'entre eux étant assez corrélés. Une autre contrainte vient de la nature des variables utilisées pour exprimer ces facteurs, qui sont pour certaines continues, pour d'autres en classes ou même purement qualitatives. Enfin il existe des interactions fortes entre certaines variables.

Nous avons donc opté pour deux méthodes complémentaires qui présentent chacune des avantages et inconvénients au regard de nos données : l'arbre de décision et la régression PLS.

L'arbre de décision est une méthode particulière de segmentation qui permet d'intégrer toutes les contraintes citées plus haut. Elle est traitée avec le logiciel S+, qui intègre une méthode de validation croisée assurant la robustesse des modèles développés.

La régression PLS est une méthode de régression factorielle procédant par itérations. Elle est traitée avec le logiciel ADE4. Elle constitue une méthode alternative à la régression multiple dès que le nombre de variables explicatives est grand et en particulier quand il est supérieur au nombre d'individus observés. Elle est fortement conseillée lorsque les variables explicatives sont significativement corrélées. Elle est très robuste par construction.

4.2. Sous-ensembles bioclimatiques

Au cours du travail sur les variables de continentalité, nous avons mis en évidence une structuration très différente du territoire entre la Basse Provence et l'arrière-pays. Les variables distance à la mer et altitude du masque étant importantes dans les modèles, nous avons cherché à savoir si les modèles ne seraient pas plus performants en traitant séparément les deux sous-régions bioclimatiques.

Nous avons donc comparé systématiquement un modèle calculé sur l'ensemble de la zone d'étude avec la combinaison de deux modèles calculés chacun sur une des deux régions bioclimatiques.

4.3. Résultats : modèles et cartes

Ce sont les modèles en régression PLS qui ont été retenus.

Quel que soit l'indice floristique utilisé, ce sont les mêmes variables climatiques, avec de faibles nuances de détail dans leur classement, qui sont dominantes : ikr, température moyenne, altitude du masque, et altitude. Le choix de l'indice de départ influe donc peu sur l'interprétation des résultats, et sur la structure du modèle.

L'ikr apparaît dans tous les cas comme la variable individuelle la plus puissante. Cette variable traduit en fait un gradient de température entre versants "frais" et versants "chauds" : cette appellation commune des versants est significative du phénomène. On note que l'altitude aussi a un rôle essentiellement thermique. L'importance de l'altitude du masque est confirmée par rapport à la distance à la mer. Les contributions conjuguées de la température, de l'ikr, de l'altitude et de l'altitude du permettent d'attribuer un poids globalement dominant à la température.

On peut cependant remarquer que dans la zone d'étude, une forte corrélation positive existe entre pluie et altitude :

- pour des raisons classiques de circulation atmosphérique, l'ascension de l'air sur les versants face aux vents dominants venant de la mer provoquent nébulosité et pluies,
- et pour des raisons géographiques, les reliefs étant plus élevés à l'Est de la zone d'étude, renforcent le gradient pluviométrique Ouest-Est entre la vallée du Rhône et la Côte d'Azur.

De ce fait, une corrélation négative se crée automatiquement entre pluie et température, toutes deux liées mais en sens inverse à l'altitude.

Il est donc impossible de différencier la part réelle de la pluie et de la température dans le modèle.

4.3.1.1. Indice de continentalité

Les variables de distance à la mer et altitude du masque ont ensemble dans les modèles un poids considérable. Cela traduit les gradients géographiques forts de température et de pluie dans la zone d'étude. Ce qui a conduit à calculer un indice synthétique de continentalité, bâti par régression PLS sur les variables Altitude du masque et distance à la mer, qui peut dans les modèles être utilisé comme variable unique en remplacement des variables de base.

Les altitudes du masque à la mer ont toujours un poids global très supérieur aux distances à la mer dans l'indice de continentalité. Cet indice s'avère être de loin la variable la plus puissante lorsqu'il est utilisé

dans les modèles de bilan hydrique. Il permet de mettre en évidence les principaux gradients écologiques régionaux à partir d'un petit nombre de variables géographiques. La carte d'indice de continentalité comprend déjà toutes les grandes lignes de la carte de bilan hydrique régional.

4.3.1.2. Sous-ensembles basse Provence / arrière pays.

Le calcul d'un modèle séparé pour les deux sous-ensembles donne des résultats prédictifs un peu meilleurs que le calcul d'un modèle unique sur l'ensemble de la zone d'étude. Il montre aussi des différences sensibles entre les sous-ensembles.

Nous avons cartographié les deux modèles obtenus, chacun à son sous-ensemble bioclimatique, puis assemblé les deux cartes pour reconstituer une carte complète de la zone d'étude. Il y a une assez grande cohérence d'ensemble, mais des problèmes aux limites car chacun des modèles prédit moins précisément les valeurs extrêmes de son domaine. Cela crée des discontinuités dans la carte à l'interface entre les deux sous-ensembles, que l'on peut résoudre partiellement à l'aide d'un lissage sur une zone tampon.

Le découpage en deux sous-ensembles bioclimatiques présente l'intérêt de montrer les différences de fonctionnement et de poids relatif des variables entre basse Provence et arrière pays. Le gain de précision sur les résultats est cependant statistiquement insuffisant pour justifier la complication liée à la multiplication des modèles, par rapport au modèle unique et cohérent calculé sur toute la zone d'étude.

4.3.2. Synthèse des résultats : modèles en régression PLS et cartes

Nous avons choisi de développer la carte régionale des potentialités forestières à partir du modèle basé sur l'axe 1 de l'AFC (indflo_glob), à partir de 11 variables climatiques, et sur l'ensemble de la zone d'étude.

Tableau n°1 : Equation du modèle

Indice floristique sur axe 1 de l'AFC		Variance expliquée : 64 %	
Variables		coef variables normées	coef variables réelles
Altitude		0.1176	0.00037972
Pluie moyenne annuelle	(log)	0.0983	0.80977
Pluie d'été	(log)	0.0838	0.45386
Température moyenne annuelle		-0.1635	-0.073777
ikr	(^2)	-0.2480	-0.32988
Distance minimale à la mer	(log)	0.0239	0.04005
Altitude du masque distance minimale		0.1213	0.00025968
Distance à la mer (157°)	(log)	0.0038	0.0062129
Altitude du masque (157°)		0.0741	0.00016668
Distance à la mer (247°)	(log)	0.0153	0.025582
Altitude du masque (247°)		0.1457	0.00038645
Constante			-2.9328

L'équation du modèle s'écrit donc :

$$IDglob = 0.00037972*alti + 0.80977*log(pmoy) + 0.45386*log(pete) - 0.073777*tmoy - 0.32988 *ikr \dots etc...$$

Cette carte brute peut être lissée pour une présentation plus claire à l'échelle régionale.

Mais elle possède une résolution et une précision suffisantes pour une utilisation à des échelles beaucoup plus fines, à l'échelle de la gestion forestière.

4.4. Précision des modèles climatiques

Le modèle climatique en régression PLS, tout en étant intéressant à l'échelle régionale, peut aussi sans difficulté être utilisé pour des études de parcelles forestières et d'aménagements forestiers, à des échelles très locales, à partir de surfaces de l'ordre de quelques hectares. C'est un des résultats les plus intéressants de cette étude.

Nous avons testé et validé cette possibilité avec des forestiers de terrain (Cellule Régionale d'Appui Technique de la DR ONF PACA). Notre modèle climatique donnant des valeurs continues, il est aisé en zoomant sur une petite zone (forêt communale par exemple), de faire des classes d'indice spécialement pour cette zone, faisant bien apparaître la variabilité locale. Ces classes locales peuvent être raccordées

à des classes principales définies sur l'ensemble de la zone d'étude, ou tout simplement re-situées dans l'intervalle des valeurs possibles de l'indice.

Des problèmes peuvent apparaître très localement en raison de la largeur du pas de calcul des variables comme l'altitude et l'ikr (le MNT a un pas de 50 m). Les plages de valeur peuvent déborder légèrement des limites naturelles au niveau de crêtes ou de vallons marqués (dans des limites ne dépassant pas la moitié du pas soit moins de 25m. Il est aisé en connaissant le fonctionnement simple du modèle, et en particulier le rôle primordial au niveau local de l'ikr, d'interpréter et de rectifier manuellement ces petites déformations.

On dispose donc d'un outil opérationnel, permettant de travailler à l'échelle de la parcelle forestière, tout en conservant un cadre cohérent et comparable sur 7000km².

5. Potentialités forestières stationnelles

5.1. Outil d'évaluation stationnelle à l'usage des forestiers

Le deuxième objectif de l'étude était de donner un modèle permettant l'évaluation des potentialités forestières à l'échelle de la station forestière.

L'indice global de potentialité est calculé en deux temps : lecture sur une carte de base de l'indice climatique qui peut être lue à toutes les échelles. La valeur lue sur cette carte est ensuite corrigée grâce un indice topo-édaphique, calculé avec une clé de détermination basée uniquement sur les variables topo-édaphiques locales faciles à mesurer ou évaluer.

Cet indice est présenté sous une forme simplifiée, proche des outils autécologiques couramment utilisés par les forestiers de terrain, détaillée les tableaux n° 2 et 3.

5.2. Lien avec les clés autécologiques

5.2.1. Tableaux généraux : ensemble des espèces

Sur un site forestier donné, l'indice de potentialité stationnelle est la combinaison de l'indice climatique donné par la carte et d'un indice topo-édaphique calculé localement. Il a paru intéressant de relier ces indices et l'indice global aux indices de fertilité de différentes espèces forestières, afin de faciliter le choix des essences pour les forestiers.

La difficulté vient du fait que chaque espèce a un rapport particulier au climat et au sol, avec un équilibre différent entre les deux composantes. Il est donc impossible de généraliser une grille d'indice global dans laquelle on pourrait aligner les classes de fertilité des différentes espèces.

On peut par contre pour chaque espèce déterminer le poids respectif de chaque composante de l'indice, ou relier les clefs autécologiques à des classes d'indice climatique et d'indice topo-édaphique.

Pour un choix parfaitement raisonné d'espèces dans un reboisement ou en gestion de peuplements naturels, il reste utile de faire appel aux clefs autécologiques qui ont été conçues dans ce but. Mais on peut quand même pour les principales espèces faire un lien entre indices de potentialité et classes de fertilité, pour mettre dans une cartographie de stations basée sur les indices, et dans un document d'aménagement, un premier choix d'espèces possibles ou signaler les espèces inadaptées.

Les tableaux n°5 permettent de positionner les principales espèces forestières méditerranéennes dans une grille basée sur le couplage :

- de la carte régionale des potentialités où l'indice climatique a été découpé en 9 classes principales),
- de 7 classes d'indice topo-édaphique.

A partir de cette grille, on peut faire un choix préalable d'espèces pour toute station de la zone d'étude.

Nous avons détaillé ensuite quelques espèces pour lesquelles des données plus précises étaient disponibles :

- le cèdre atlantique, pour lequel la clef autécologique a été conçue sur une région recoupant largement notre zone d'étude),
- le pin d'Alep pour lequel nous disposons des classes de fertilité dans 300 des 325 placettes utilisées pour cette étude,
- le chêne blanc, qui avait fait l'objet d'observations détaillées sur toute les placettes de la zone d'étude, bien qu'il n'y ait pas eu assez de données pour établir une clef autécologique.

6. Perspectives d'avenir

6.1. Extension du modèle à la zone méditerranéenne française.

L'hypothèse de départ, basée sur la prédominance du bilan hydrique, ayant été vérifiée, on peut envisager l'extension de la méthode sur l'ensemble de la basse Provence, une partie de l'arrière pays (zone inférieure du bioclimat supra-méditerranéen), et sur les parties bioclimatiquement équivalentes de la région Languedoc-Roussillon. Un cas particulier est constitué par la Provence cristalline, pour laquelle on dispose déjà d'une base de données qu'il faudrait compléter, et d'un catalogue de station construit sur des principes proches de cette étude.

Il est envisageable à terme de couvrir l'ensemble de la région méditerranéenne française avec une grille unique et cohérente de potentialité, reliée à la productivité des espèces forestières.

Sur l'ensemble de cette zone française, le découpage en petites régions naturelles, qui reste valable, pourra être affiné dans le détail.

La méthode pourrait être utilisée et développée dans tous les autres pays méditerranéens où peuvent être trouvés des peuplements forestiers correctement préservés. Dans les pays et régions où la flore est trop perturbée, elle doit être utilisée avec prudence et nécessite une adaptation.

6.2. Autres usages possibles des modèles

6.2.1. Simulation de l'impact des changements climatiques

Dans les modèles en PLS ou en arbre de décision, on peut faire varier à volonté différents paramètres, par exemple pluie et température. On peut visualiser de façon très précise sur des cartes, grâce au SIG, les conséquences de ces changements sur la végétation, notamment le déplacement de limites prédéfinies.

En appliquant sur la zone d'étude les scénarios de changements climatiques prévus à différentes échéances, on pourrait ainsi visualiser et analyser en détail les conséquences de ces changements sur des sites protégés (réserves naturelles, sites natura 2000,...), sur des limites de végétation, sur l'aire potentielle de répartition de certaines espèces, ...

On pourrait aussi étudier les interactions entre changements climatiques et d'autres facteurs : classes d'altitude, exposition, indice topo-édaphique.

6.2.2. Suivi de la dynamique de la végétation après incendie ou abandon agricole.

Sur une zone incendiée ou en déprise, la végétation n'est pas en équilibre avec le milieu. Mais on peut représenter dans les mêmes repères de l'AFC de base de l'étude :

- d'une part l'indice floristique actuel d'un site, à partir de l'inventaire de sa flore,
- d'autre part ses indices de potentialité climatique et topo-édaphique à partir du relevé des variables abiotiques et des modèles.

Il est ainsi possible de comparer la situation actuelle d'un site perturbé ou en évolution et son état potentiel à moyen ou long terme. On peut alors :

- savoir si la végétation actuelle est loin ou non d'un certain état d'équilibre,
- et si on dispose d'un suivi diachronique sur un nombre suffisant d'années, quelle est, après perturbation, la trajectoire d'un site dans son retour à l'équilibre : le retour se fait-il rapidement ou non, se fait-il directement ou passe-t-il par des phases intermédiaires éloignées du point d'arrivée théorique ? Les espèces finales sont elles en place rapidement, la maturation se faisant par croissance des arbres et ligneux, ou s'installent-elles progressivement au fur et à mesure de l'évolution ?

Il serait possible à partir d'une typologie des milieux étudiés et d'une analyse poussée de la flore (profils indicés, groupes fonctionnels, groupes floristiques), de définir pour n'importe quel site perturbé de la zone d'étude une végétation potentielle. Cette végétation serait définie par les indices de potentialité et par sa composition, avec une probabilité de présence et d'abondance des différentes espèces.

6.2.3. Valorisation scientifique du projet

Une thèse est en cours pour valoriser auprès de la communauté scientifique les méthodes qui ont été développées spécifiquement pour cette étude.

Cartographie des potentialités forestières à petite échelle sur de grandes surfaces

DOMAINE D'ETUDE

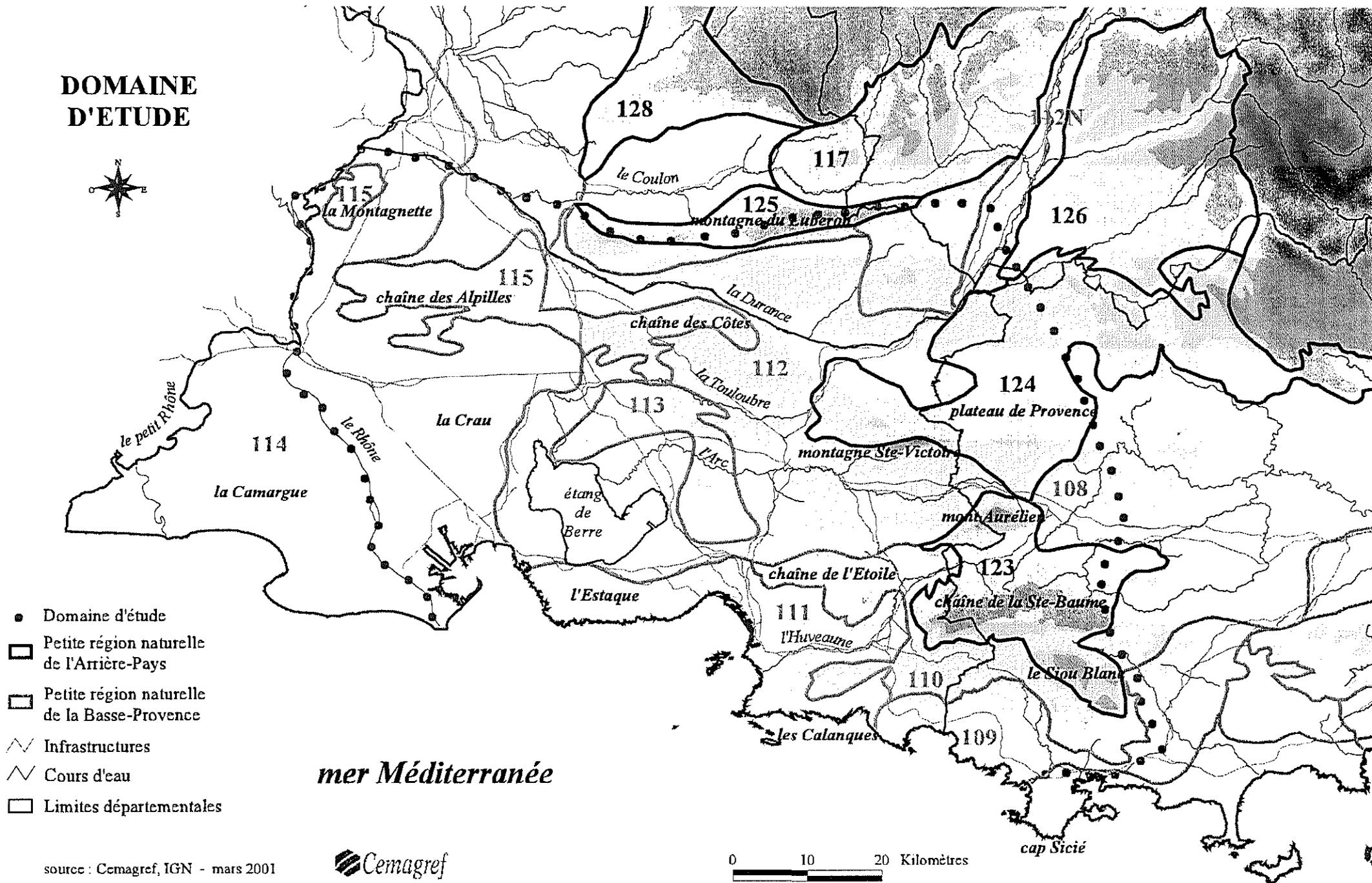
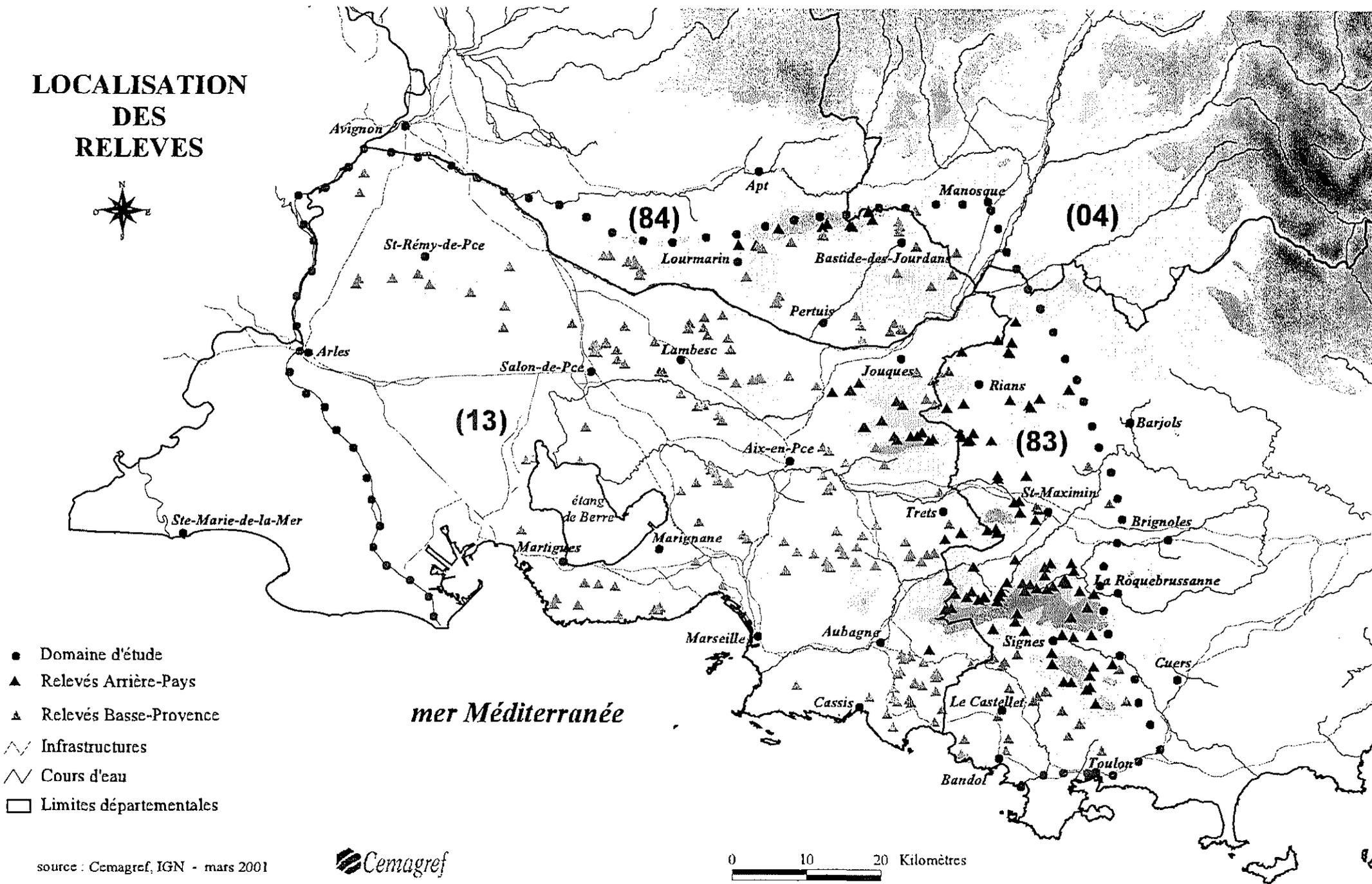


Figure 1.b : Cartographie des potentialités forestières à petite échelle sur de grandes surfaces

LOCALISATION
DES
RELEVÉS



- Domaine d'étude
- ▲ Relevés Arrière-Pays
- △ Relevés Basse-Provence
- Infrastructures
- Cours d'eau
- Limites départementales

Indice de climat lumineux de Becker

Limites des classes d'IKR

$ikr > 1.10$ <u>CHAUD</u>	$1.05 > ikr > 0.95$ <u>NEUTRE</u>	$IKR < 0.8$ <u>FROID</u>
------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------

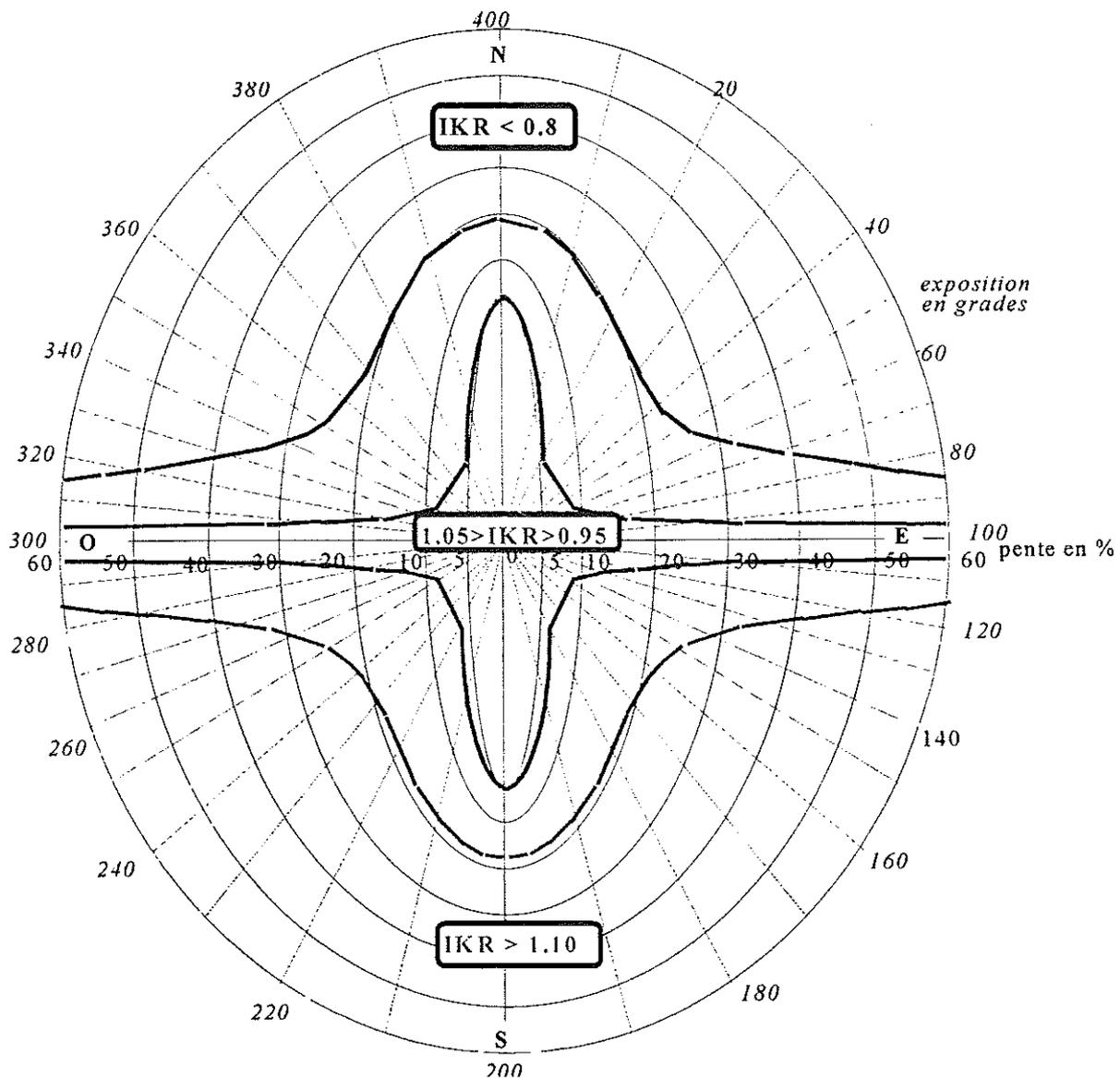
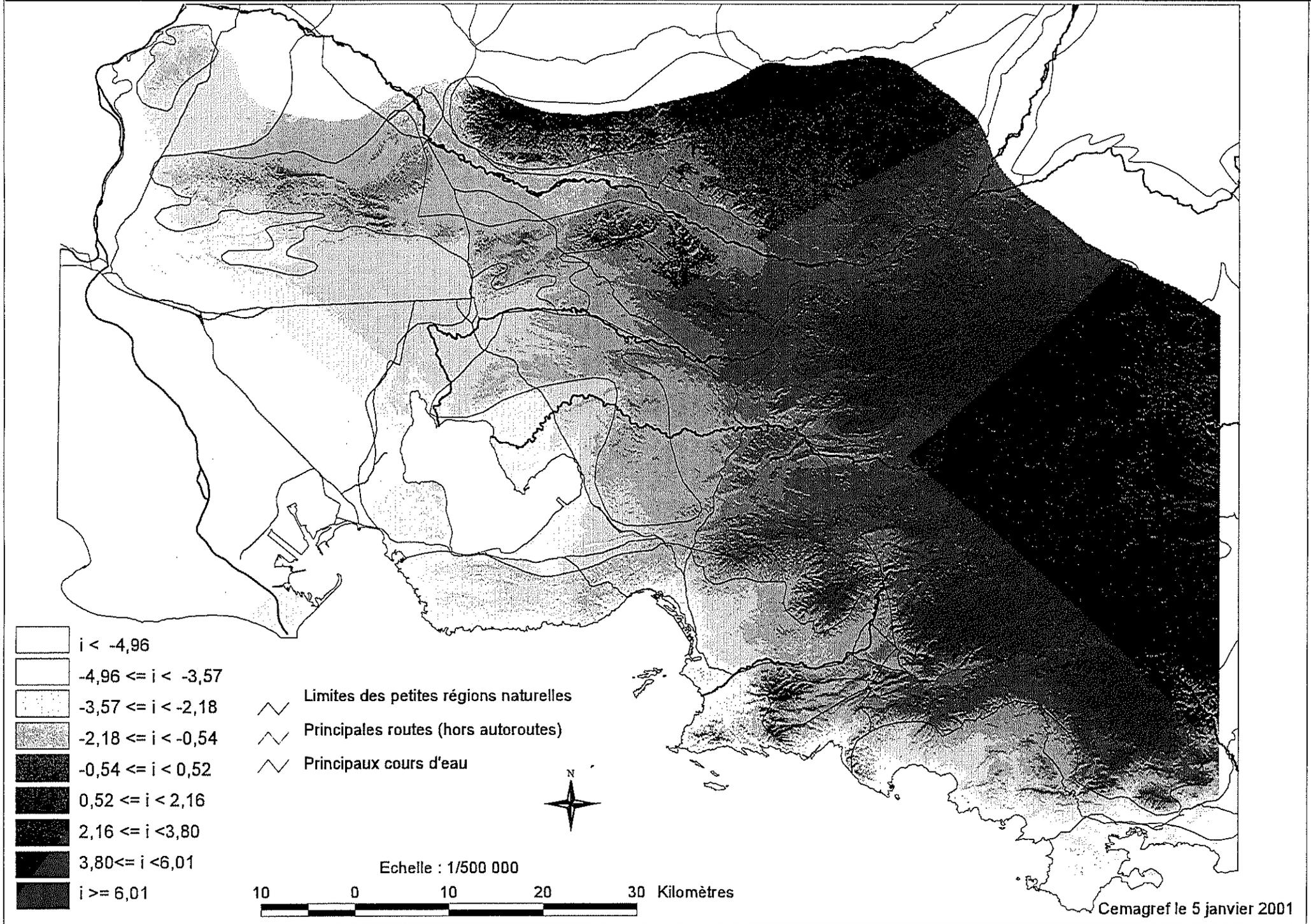


fig n°8 : indice de potentialités forestières ; modèle unique pour la zone d'étude. Carte brute.



Description des plages d'indices climatiques

Valeurs dominantes

Valeurs dominantes

PLAGE ROUGE	Température	15 à 15,5 ° (type 7)	Pluviométrie/an	450 à 600 mm (type 8)
	Mois sec	>= 4	Pluie d'été	55 à 70
Indice climatique < 4,96	mois froid	0	Alti masque	< 150 m
Altitude < 150 m	Exposition	toutes	Dist mer	0 à 10km

PLAGE ROSE	Température	14,5 à 15 °c (type 6)	Pluviométrie/an	460 à 750 mm (type 8)
	Mois sec	4	Pluie d'été	55 à 95 mm
Indice climatique -4,96 à -3,57	mois froid	0	Alti masque	< 200m
Altitude < 200 m	exposition	toutes	Dist mer	0 à 40 km

PLAGE ORANGE	Température	14 à 15 °c (type 6)	Pluviométrie/an	500 à 830 (type 8)
	Mois sec	2 à 3	Pluie d'été	60 à 110 mm
Indice climatique -3,57 à -2,18	mois froid	2 à 3	Alti masque	< 360 m
Altitude < 200	exposition	toutes	Dist mer	0 à 60 km

PLAGE JAUNE	Température	13 à 14,5 ° c (type 5-6)	Pluviométrie/an	500 à 860 mm (type 8)
	Mois sec	2 à 3	Pluie d'été	65 à 115 mm
Indice climatique -2,18 à -0,54	mois froid	2 à 3	Alti masque	95 à 560 m
Altitude 40 à 300 m	exposition	toutes	Dist mer	0 à 70 km

PLAGE GRISE	Température	12,5 à 14 °c (type 5)	Pluviométrie/an	530 à 860 mm (type 8)
	Mois sec	2 à 3	Pluie d'été	75 à 115 mm
Indice climatique -0,54 à 0,52	mois froid	2 à 3	Alti masque	160 à 740 m
Altitude 100 à 400 m	exposition	toutes	Dist mer	13 à 80 km

PLAGE BLEU	Température	12 à 14 °c (type 5-4)	Pluviométrie/an	560 à 880 mm (type 8)
	Mois sec	2 à 3 (1)	Pluie d'été	75 à 130 mm
Indice climatique 0,52 à 2,16	mois froid	2 à 3	Alti masque	220 à 990 m
Altitude 170 à 500	exposition	toutes	Dist mer	15 à 90 km

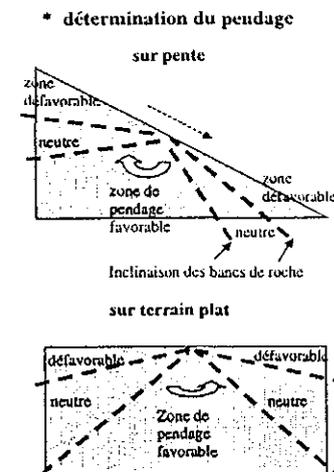
PLAGE VERT CLAIR	Température	11,5 à 14 °c (type 4-5)	Pluviométrie/an	620 à 980 mm (type 6)
	Mois sec	2 (1)	Pluie d'été	90 à 145 mm
Indice climatique 2,16 à 3,80	mois froid	2 à 3	Alti masque	330 à 1000 m
Altitude 200 à 600 m	exposition	toutes	Dist mer	15 à 90 km

PLAGE VERTE	Température	10,5 à 13 °c (type 4)	Pluviométrie/an	620 à 990 mm (6)
	Mois sec	2 (1)	Pluie d'été	95 à 155 mm
Indice climatique 3,80 à 6,01	mois froid	3 à 4	Alti masque	420 à 1000 m
Altitude 300 à 700 m	exposition	Tendance fraîche	Dist mer	15 à 90 km

PLAGE VERT FONCE	Température	9 à 12,5 °c (type 3)	Pluviométrie/an	640 à 1000mm (type 6-(7))
	Mois sec	2 (1)	Pluie d'été	95 à 175 mm
Indice climatique > 6,01	mois froid	4 à 5	Alti masque	615 à 1000 m
Altitude 500 à 1000 m	exposition	Tendance froide	Dist mer	20 à 100 km

Indice topo-édaphique pour évaluation de la productivité forestière sur substrats issus de roches dures

		facteurs défavorables				facteurs neutres				facteurs favorables			
TOPOGRAPHIE	topographie générale	sommet	-14	haut de pente	-6	pente	-3	plateau	0	bas pente	10	vallon	18
	topographie stationnelle			convexe	-8			plan	0	concave	8		
	banquettes							absence	0	présence	13		
	pente du terrain					> 27° ou 50%	-1	< 27° ou 50%	0				
ROCHE	affleurement rocheux	>= 30%	-8	10 - 30%	-3	1 - 10 %	-1	0	0				
	affleurement de cailloux			>= 30%	-3	10 - 30%	-2	1 - 10 %	0	0	2		
	pendage /pente (sur altérite et colluvion mince < 50 cm) *					défavorable	-1	neutre	0	favorable	1		
	Diaclases (sur altérite et colluvion mince < 50 cm)			sans	-2	faible	-1	moyen	0	fort	1		
MATERIAU	matériau de référence	roche	-4	altérite	-2	lapiaz	-1			colluvium	5		
	éléments grossiers	>= 90%	-7	60-90%	-3			30-60%	0	10-30%	3	< 10%	4
	plaquettes horizontales			présentes	-6			absentes	0				
	HCl terre					forte	-2	faible	0	nul	3		
PROFONDEUR	réserve utile / texture **	<= 0,7mm/cm	-10	1 à 1,3	-3			1,35 à 1,6	0	1,7 à 1,95	5	2	10
	épaisseur de la colluvion			absent	-2	5-20 cm	-1	25-50 cm	0	> 50 cm	3		
PROFONDEUR	profondeur totale	0-20 cm	-12	25-45 cm	-5			50-75 cm	0	75-100	5	> 100 cm	10
	tests tarière					0-20 cm	-2	21-40 cm	0	41-75cm	2	> 75 cm	3



** réserve utile / texture

composition texturale	codage de la composition texturale			réserve utile en mm/cm
	S	L	A	
sable limon argile	0	0	0	1,75
0	0	0	2	1,85
0	0	1	1	1,8
0	0	1	2	1,5
0	0	2	1	1,95
0	0	2	2	1,85
0	1	0	1	1,55
0	1	0	2	1,7
0	1	1	0	1,3
0	1	1	1	2
0	1	1	2	1,75
0	1	2	0	1,45
0	1	2	1	1,82
0	1	2	2	1,78
1	0	0	0	0,7
1	0	0	1	1,35
1	0	0	2	1,55
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1,5
1	0	1	2	1,6
1	0	2	0	1,3
1	0	2	1	1,6
1	0	2	2	2

indice topo-édaphique = [] + [] + [] + [] + [] + []

Indice topo-édaphique pour l'évaluation de la productivité forestière sur roches fluides* (altérite et colluvion)

*(marne, argilite, sable)

facteurs défavorables

facteurs neutres

facteurs favorables

CATEGORIE	DESCRIPTION	facteurs défavorables			facteurs neutres			facteurs favorables			
		score	description	score	description	score	description	score	description	score	
TOPOGRAPHIE	topographie générale	-10	sommet croupe haut de pente	-4	pente	0	plateau	7	bas pente	13	vallon vallée
	topographie stationnelle			-3	convexe	0	plan	5	concave		
	pente du terrain					-2	> 27° ou 50%	0	< 27° ou 50%		
	banquettes						0	absence	4	présence	
MATERIAU	matériau de référence			-6	roche	-3	altérite	5	colluvium		
	éléments grossiers	-10	>= 90% ou matériau fluide	-5	60-90%		30-60%	4	10-30%	6	< 10%
	HCl terre			-4	forte		faible	4	nul		
	réserve utile / texture **	-15	<= 0,7mm/cm	-5	1 à 1,3		1,35 à 1,6	6	1,7 à 1,95	2	10
PROFONDEUR	épaisseur de colluvion			-5	absent	-2	5-20 cm	0	> 50 cm	5	
	nature du colluvion					-5	mameux		autre	5	
	profondeur totale	-10	0-20 cm			-4	25-45 cm	0	50-75 cm	5	> 200 cm
	test tarière			-6	0-20 cm		21-40 cm	0	41-75cm	5	> 75 cm

** réserve utile / texture

composition texturale	codage de la composition texturale			réserve utile en mm/cm
	S	L	A	
0 0 0	0	0	0	1.75
0 0 1	0	0	1	1.85
0 0 2	0	0	2	1.8
0 1 0	0	1	0	1.5
0 1 1	0	1	1	1.95
0 1 2	0	1	2	1.85
1 0 0	1	0	0	1.55
1 0 1	1	0	1	1.7
1 0 2	1	0	2	1.3
1 1 0	1	1	0	2
1 1 1	1	1	1	1.75
1 1 2	1	1	2	1.45
1 2 0	1	2	0	1.82
1 2 1	1	2	1	1.78
1 2 2	1	2	2	
2 0 0	2	0	0	0.7
2 0 1	2	0	1	1.35
2 0 2	2	0	2	1.55
2 1 0	2	1	0	1
2 1 1	2	1	1	1.5
2 1 2	2	1	2	1.6
2 2 0	2	2	0	1.3
2 2 1	2	2	1	1.6
2 2 2	2	2	2	2



indice topo-édaphique brut :

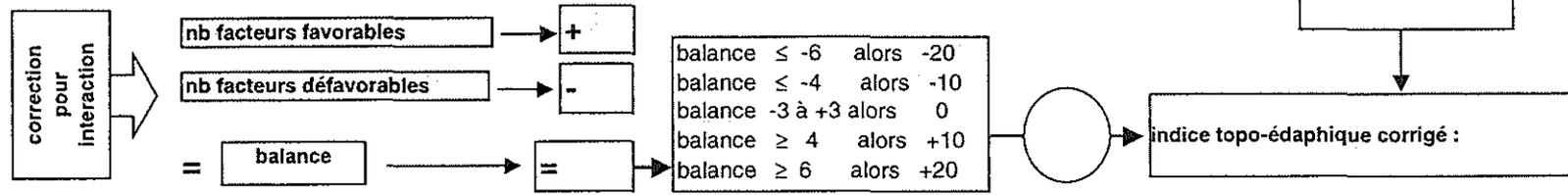


Tableau n° 4 : classes de réserve en eau utile du sol calculée sur la texture.
(annexe des tableaux n°2 et 3)

Composition texturale			Codage textural			Réserve utile en mm/cm	Classe de réserve utile
sable	limon	argile	S	L	A		
0	0	0					
		1					
		2					
	1	0					
		1					
		2					
	2	0					
		1					
		2					
			0	0	2	1,75	4
			0	1	1	1,85	4
			0	1	2	1,80	4
			0	2	0	1,50	3
			0	2	1	1,95	4
			0	2	2	1,85	4

sable	limon	argile	S	L	A		
1	0	0					
		1					
		2					
	1	0					
		1					
		2					
	2	0					
		1					
		2					
			1	0	1	1,55	3
			1	0	2	1,70	4
			1	1	0	1,30	2
			1	1	1	2,00 *	5
			1	1	2	1,75	4
			1	2	0	1,45	3
			1	2	1	1,82	4
			1	2	2	1,78	4

sable	limon	argile	S	L	A		
2	0	0					
		1					
		2					
	1	0					
		1					
		2					
	2	0					
		1					
		2					
			2	0	0	7,0	1
			2	0	1	1,35	3
			2	0	2	1,55	3
			2	1	0	1,00	2
			2	1	1	1,50	3
			2	1	2	1,60	3
			2	2	0	1,30	2
			2	2	1	1,60	3
			2	2	2	2,00 *	5

* On note que les textures équilibrées (notées 1.1.1 ou 2.2.2) sont dotées d'une RU supérieure à toutes les autres classes.

Cette RU ne correspond pas au calcul de la réserve utile réelle, mais à une codification permettant de traduire les qualités exceptionnelles de ces textures équilibrées, qui se traduisent toujours par une amélioration des indices floristiques et des indice de fertilité pour les arbres.

Relation entre indices de potentialité et productivité des espèces méditerranéennes

indice Climatique x 10			Pin d'Alep	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		très		très		très		très		très		très				
			-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80	
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95	~~~~~	-75	.....	-55	.....	-35	.....	-15	//////////	30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93		-73	~~~~~	-53	.....	-33	.....	-13	//////////	7	//////////	44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79	~~~~~	-59	.....	-39	.....	-19	//////////	1	//////////	21	//////////	58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64	~~~~~	-44	.....	-24	.....	-4	//////////	16	//////////	36	//////////	75
0	-5	à 5	plage grise	-85	~~~~~	-50	~~~~~	-30	.....	-10	.....	10	//////////	30	//////////	50	//////////	85
13	5	à 22	plage bleu	-75	~~~~~	-37	~~~~~	-17	.....	3	.....	23	//////////	43	//////////	63	//////////	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58	~~~~~	-20	~~~~~	0	.....	20	.....	40	//////////	60	//////////	80	//////////	118
49	38	à 60	plage verte	-42	~~~~~	-1	~~~~~	19	.....	39	.....	59	//////////	79	//////////	99	//////////	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25		45	~~~~~	65	.....	85	.....	105	.....	125	.....	190

indice Climatique x 10			Cyprés Arizona	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		très		très		très		très		très		très				
			-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80	
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95	~~~~~	-75	.....	-55	.....	-35	.....	-15	//////////	30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93		-73	~~~~~	-53	.....	-33	.....	-13	//////////	7	//////////	44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79	~~~~~	-59	.....	-39	.....	-19	//////////	1	//////////	21	//////////	58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64	~~~~~	-44	.....	-24	.....	-4	//////////	16	//////////	36	//////////	75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50	~~~~~	-30	.....	-10	.....	10	//////////	30	//////////	50	//////////	85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37	~~~~~	-17	.....	3	.....	23	//////////	43	//////////	63	//////////	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58		-20	~~~~~	0	.....	20	.....	40	//////////	60	//////////	80	//////////	118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1	~~~~~	19	.....	39	.....	59	//////////	79	//////////	99	//////////	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25	~~~~~	45	~~~~~	65	.....	85	.....	105	.....	125	.....	190

indice Climatique x 10			Pin pignon	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		très		très		très		très		très		très				
			-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80	
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95	~~~~~	-75	.....	-55	.....	-35	//////////	-15	//////////	30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93		-73	~~~~~	-53	.....	-33	.....	-13	//////////	7	//////////	44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79	~~~~~	-59	.....	-39	.....	-19	//////////	1	//////////	21	//////////	58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64	~~~~~	-44	.....	-24	.....	-4	//////////	16	//////////	36	//////////	75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50	~~~~~	-30	.....	-10	.....	10	//////////	30	//////////	50	//////////	85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37	~~~~~	-17	.....	3	.....	23	//////////	43	//////////	63	//////////	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58		-20	~~~~~	0	.....	20	.....	40	//////////	60	//////////	80	//////////	118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1	~~~~~	19	.....	39	.....	59	//////////	79	//////////	99	//////////	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25	~~~~~	45	~~~~~	65	.....	85	.....	105	.....	125	.....	190

Bornes d'indice global pour la classe d'indice topoédaphique considérée

Relation entre indices de potentialité et productivité des espèces méditerranéennes

indice Climatique x 10			Cyprés vert	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115	~~~~~	-95		-75	~~~~~	-55	~~~~~	-35	::::::::::	-15	::::::::::	30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93	~~~~~	-73		-53	~~~~~	-33	~~~~~	-13	::::::::::	7	//////////	44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79	~~~~~	-59	~~~~~	-39	~~~~~	-19	~~~~~	1	//////////	21	//////////	58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64	~~~~~	-44	~~~~~	-24	::::::::::	-4	::::::::::	16	//////////	36	//////////	75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50	~~~~~	-30	~~~~~	-10	::::::::::	10	::::::::::	30	//////////	50	//////////	85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37	~~~~~	-17	~~~~~	3	::::::::::	23	::::::::::	43	//////////	63	//////////	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58		-20	~~~~~	0	~~~~~	20	::::::::::	40	::::::::::	60	//////////	80	//////////	118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1	~~~~~	19	~~~~~	39	::::::::::	59	::::::::::	79	::::::::::	99	::::::::::	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25	~~~~~	45	~~~~~	65	::::::::::	85	::::::::::	105		125		190

indice Climatique x 10			Pin Eldarica	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115	~~~~~	-95	::::::::::	-75	::::::::::	-55	::::::::::	-35	//////////	-15	//////////	30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93	~~~~~	-73	::::::::::	-53	::::::::::	-33	//////////	-13	//////////	7	//////////	44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79	~~~~~	-59	::::::::::	-39	//////////	-19	//////////	1	//////////	21	//////////	58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64	~~~~~	-44	::::::::::	-24	//////////	-4	//////////	16	//////////	36	//////////	75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50	???	-30	???	-10	???	10	???	30	???	50	???	85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37	???	-17	???	3	???	23	???	43	???	63	???	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58		-20	???	0	???	20	???	40	???	60	???	80	???	118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1	???	19	???	39	???	59	???	79	???	99	???	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25	???	45	???	65	???	85	???	105	???	125	???	190

indice Climatique x 10			Pin Brutia	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95		-75		-55		-35		-15		30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93		-73		-53		-33		-13		7		44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79		-59		-39		-19		1		21		58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64	~~~~~	-44	~~~~~	-24	::::::::::	-4	::::::::::	16	::::::::::	36	::::::::::	75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50	~~~~~	-30	~~~~~	-10	::::::::::	10	::::::::::	30	//////////	50	//////////	85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37	~~~~~	-17	~~~~~	3	::::::::::	23	::::::::::	43	//////////	63	//////////	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58		-20	~~~~~	0	~~~~~	20	::::::::::	40	::::::::::	60	//////////	80	//////////	118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1	~~~~~	19	~~~~~	39	::::::::::	59	//////////	79	//////////	99	//////////	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25	~~~~~	45	~~~~~	65	::::::::::	85	//////////	105	//////////	125	//////////	190

Bornes d'indice global pour la classe d'indice topoédaphique considérée

Relation entre indices de potentialité et productivité des espèces méditerranéennes

indice Climatique x 10			Chêne vert	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95	-----	-75	.....	-55	.....	-35	.....	-15	.....	30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93	-----	-73	.....	-53	.....	-33	.....	-13	.....	7	.....	44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79	-----	-59	.....	-39	.....	-19	.....	1	.....	21	////	58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64	-----	-44	.....	-24	.....	-4	.....	16	.....	36	////	75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50	-----	-30	.....	-10	.....	10	.....	30	////	50	////	85
13	5	à 22	plage bleu	-75	-----	-37	-----	-17	.....	3	.....	23	.....	43	////	63	////	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58	-----	-20	-----	0	.....	20	.....	40	.....	60	////	80	////	118
49	38	à 60	plage verte	-42	-----	-1	-----	19	.....	39	.....	59	.....	79	////	99	////	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20	-----	25	-----	45	.....	65	.....	85	.....	105	.....	125	.....	190

indice Climatique x 10			Chêne blanc	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95	-----	-75		-55		-35		-15	-----	30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93		-73	-----	-53		-33		-13		7	-----	44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79		-59	-----	-39		-19		1	-----	21	.....	58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64		-44	-----	-24		-4		16	-----	36	.....	75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50		-30	-----	-10		10	-----	30	-----	50	////	85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37		-17	-----	3	-----	23	.....	43	////	63	////	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58		-20		0	-----	20	-----	40	.....	60	////	80	////	118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1		19	-----	39	.....	59	////	79	////	99	////	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25	-----	45	.....	65	////	85	////	105	////	125	////	190

indice Climatique x 10			Cèdre	Indice topo-édaphique														
moy	min	max		-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95	-----	-75		-55		-35		-15		30
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93		-73	-----	-53		-33		-13		7	-----	44
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79		-59	-----	-39		-19		1		21	-----	58
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64		-44	-----	-24		-4		16	-----	36	.....	75
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50		-30	-----	-10		10	-----	30	-----	50	////	85
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37		-17	-----	3	-----	23	.....	43	////	63	////	102
30	22	à 38	plage verte clair	-58		-20		0	-----	20	-----	40	.....	60	////	80	////	118
49	38	à 60	plage verte	-42		-1		19	-----	39	.....	59	////	79	////	99	////	140
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25	-----	45	.....	65	////	85	////	105	////	125	////	190

Bornes d'indice global pour la classe d'indice topoédaphique considérée

Relation entre indices de potentialité et productivité des espèces méditerranéennes

indice Climatique x 10			Sapin de Grèce	Indice topo-édaphique															
moy	min	max		-80	extrême	-50	défavorable	-30	défavorable	-10	moyen	10	favorable	30	favorable	50	exceptionnel	80	
-65	-80	à -50	plage rouge	-160		-115		-95		-75		-55		-35		-15		30	
-43	-50	à -36	plage rose	-130		-93		-73		-53		-33		-13		7		44	
-29	-36	à -22	plage orange	-116		-79		-59		-39		-19		1		21		58	
-14	-22	à -5	plage jaune	-102		-64		-44		-24		-4		16	~~~~~	36	~~~~~	75	
0	-5	à 5	plage grise	-85		-50		-30		-10		10		30	~~~~~	50	:::::|||||	85	
13	5	à 22	plage bleu	-75		-37		-17		3	~~~~~	23	~~~~~	43	~~~~~	63	::|||||	102	
30	22	à 38	plage verte clair	-58		-20		0	:::::|||||	20	:::::|||||	40	:::::|||||	60	:::::|||||	80	|||||	118	
49	38	à 60	plage verte	-42		-1	~~~~~	19	:::::|||||	39	:::::|||||	59	:::::|||||	79	|||||	99	|||||	140	
75	60	à 110	plage verte foncé	-20		25	~~~~~	45	:::::|||||	65	::|||||	85	|||||	105	|||||	125	|||||	190	

Bornes d'indice global pour la classe d'indice topoédaphique considérée

Correction topo-édaphique →



Valeur enlevée à la borne inférieure (*min*) de l'indice climatique de la plage considérée

Valeur retirée ou ajoutée à l'indice climatique moyen de la plage considérée

Valeur ajoutée à la borne supérieure (*max*) de l'indice climatique de la plage considérée

Les bornes d'une colonne correspondent à l'indice climatique moyen des plages auquel on a ajouté les valeurs de correction topo-édaphique, sauf pour les colonnes extrêmes pour lesquelles on a ajouté la correction aux bornes min ou max des indices climatiques de la plage (*bornes min côté défavorable, bornes max côté favorable*).

Pour la plage verte foncé, on a considéré la moyenne des pixels de la plage (~75) et non le milieu de l'intervalle de la classe.

Précisons que les indices climatiques ont été multipliée par 10 par rapport aux valeurs données par le modèle initial.

Légende adaptation de l'espèce aux sites :

- très difficile ou espèce exclue** : Croissance très faible, bas de la plus petite classe de fertilité, IV ou V suivant les essences ; ou bien conditions de milieu ne correspondant pas du tout aux exigences de l'espèce.
- difficile** : Facteurs limitants encore forts : croissance faible, classe de fertilité IV ou V.
- moyenne** : Les conditions de milieu correspondent assez bien aux exigences de l'essence. La croissance est centrée sur la ou les classes médianes de fertilité.
- bonne ou très bonne** : Les conditions de milieu correspondent très bien aux exigences de l'essence. La croissance est centrée sur les meilleures classes de fertilité I ou II.