



AFORCE
RMT Adaptation des forêts
au changement climatique



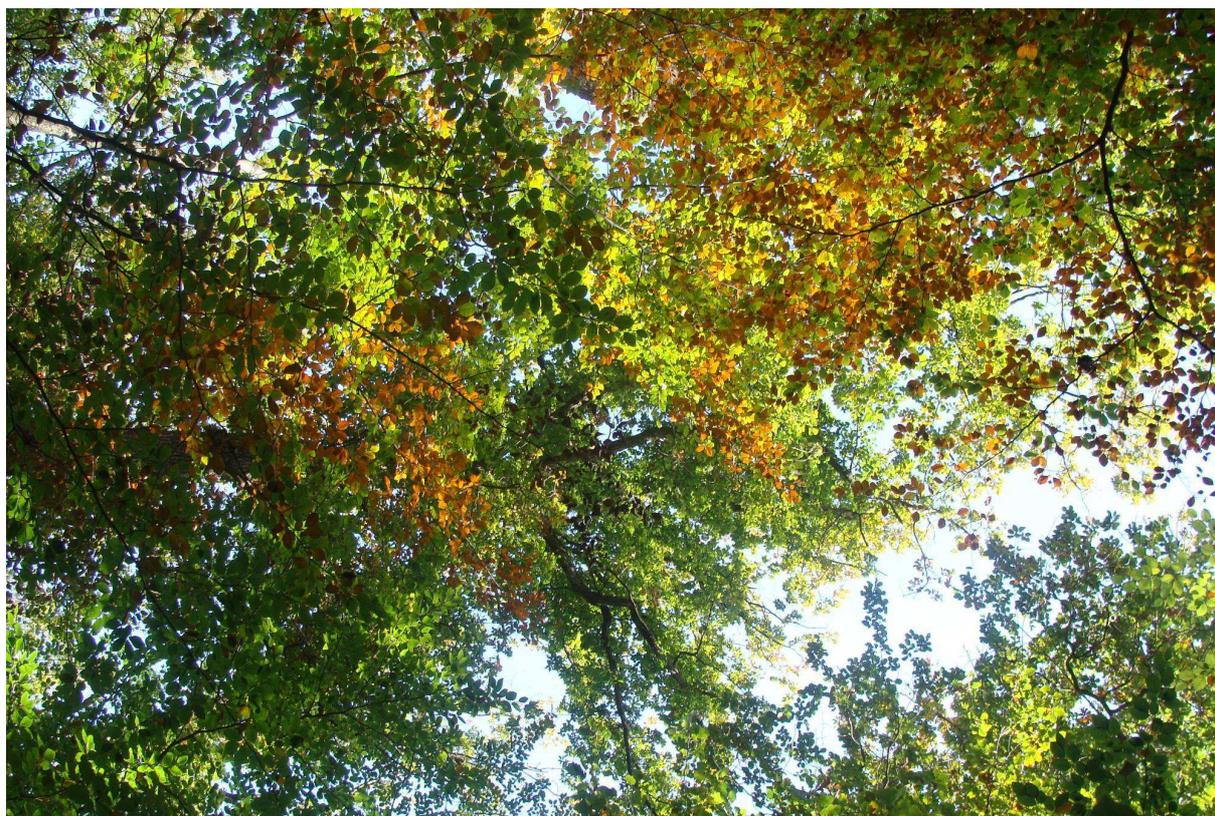
INSTITUT CDC
POUR LA RECHERCHE

L'autécologie des essences forestières et son intégration dans les outils d'aide à la décision : synthèse et évaluation

Etude menée dans le cadre du projet TRAITAUT :
« Traits fonctionnels et autécologie des essences forestières »

Alice Michelot¹, Sophie Gachet², Myriam Legay³ et Guy Landmann¹

¹Groupement d'Intérêt Public Ecofor, 75116 Paris, France ; ²Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale, 13397 Marseille Cedex 20, France ; ³Office National des Forêts, Pôle R&D, 54000 Nancy, France.



Nous remercions les organismes financeurs du projet Traitaut : le GIP ecofor et le RMT Aforce, ainsi que tous les participants aux deux réunions du projet et les experts qui ont contribué à cette démarche collective. Nous tenons à remercier plus particulièrement les relecteurs de ce document : Claire Damesin, François Lebourgeois et Jean-Luc Peyron.

Sommaire

Introduction	4
I. Définitions.....	7
1. L'autécologie.....	7
2. Les facteurs abiotiques	10
3. Les réponses biologiques	13
II. Les outils d'aide à la décision intégrant l'autécologie	16
1. AFFOREST	17
2. Decision Support Dobrova (DSD)	19
3. Ecological Site Classification (ESC).....	25
4. ForestGALES	28
5. Tree Atlas	31
6. Tableau de synthèse des outils présentés	34
III. Cahier des charges pour un outil d'aide à la décision dans le contexte du changement climatique	36
1. Utilisateurs ciblés et aide à la décision.....	36
2. Objectifs	36
3. Construction de l'outil.....	37
Conclusion et perspectives	39
Bibliographie	41

Introduction

Les écosystèmes forestiers s'étendent sur 16 million d'hectares en France métropolitaine, classant la France au quatrième rang des pays les plus boisés de l'Union Européenne. Du fait de la diversité climatique, géologique et topographique du pays, les forêts françaises sont riches et diversifiées en espèces végétales, avec 6 espèces d'arbres par km² (IGN, 2013). Des problématiques socio-économiques majeures sont associées aux forêts françaises dont la filière représente 450 000 emplois et un chiffre d'affaires annuel de 57 milliards d'euros (de l'Estoile, 2012). Elles fournissent un grand nombre de services écosystémiques d'approvisionnement, de régulation, de soutien et culturels (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), comme :

- la production de bois et de biomasse pour les constructions, l'ameublement, la pâte à papier et la production d'énergie renouvelable (enjeu important pour le développement durable) ;
- la séquestration du carbone, avec environ 80 tC.ha⁻¹ stocké dans la biomasse forestière (aérienne et souterraine, 2006-2009) et 14 GtC.ha⁻¹.an⁻¹ (1999-2010, IFN, 2011) soit 14% des émissions brutes de CO₂ annuelles ;
- l'amélioration de la qualité de l'eau (Abildtrup *et al.*, in press) ;
- la création d'habitats pour la préservation de la biodiversité ;
- la chasse et la récréation avec 1010 million de visites d'individus par an (IFN, 2011).

Des études récentes ont montré que le fonctionnement des essences forestières (p. ex. Bréda *et al.*, 2006 ; Choat *et al.*, 2012) et la composition spécifique des forêts (Bertrand *et al.*, 2011 ; Morin *et al.*, 2011) peuvent être modifiés par le changement climatique. Le changement climatique, en particulier les sécheresses, peuvent influencer directement les services écosystémiques comme la production de bois (Saxe *et al.*, 2001 ; Bréda *et al.*, 2006), la séquestration du carbone (Ciais *et al.*, 2005 ; Granier *et al.*, 2007) et les services culturels *via* la diminution de la santé des forêts (Allen *et al.*, 2010). Ainsi, la défoliation des houpriers a augmenté dans les forêts du sud de l'Europe de 1987 à 2007 (Carnicer *et al.*, 2011). La mortalité des arbres a légèrement augmenté entre 2003 et 2006 en Europe, spécialement pour les feuillus (Bréda et Badeau, 2008). A l'échelle française, une mortalité anormalement élevée a été observée après la sécheresse de 2003, avec un taux atteignant 1,3 % pour les conifères contre 0,2 % en moyenne de 1989 à 2003. Ces taux de mortalité sont d'autant plus importants pour les populations situées en limite sud de répartition des espèces ou implantées dans des situations peu favorables (Jump *et al.*, 2006). Le changement climatique influence aussi indirectement les services écosystémiques *via* leurs impacts sur la croissance radiale (Michelot *et al.*, 2012) et sur la biodiversité (Thomas *et al.*, 2004 ; Bellard *et al.*, 2012). Par exemple, l'augmentation du nombre d'espèces d'arbres dans un peuplement peut accroître la productivité forestière (Morin *et al.*, 2011 ; Zhang *et al.*, 2012).

La durée des cycles de révolution des peuplements forestiers est de l'ordre d'une centaine d'années nécessitant une vision à long terme de leur potentiel d'adaptation. La vitesse de

migration naturelle des essences forestières est faible par rapport à la vitesse du changement climatique (Davis et Shaw, 2001), ce qui nécessite la mise en place de stratégies d'adaptation dès à présent. Il y a cependant là un véritable défi pour les gestionnaires confrontés à la nécessité d'agir malgré l'incertitude du changement climatique (Millar *et al.*, 2007 ; Scott *et al.*, 2010). Plusieurs stratégies adaptatives en termes de choix d'espèces peuvent en effet être envisagées : (i) l'augmentation de la variabilité intra-spécifique qui permettrait d'augmenter la diversité génétique et de choisir des provenances résistantes au changement climatique (ii) l'augmentation de la richesse spécifique, soit en favorisant les mélanges d'essences pied à pied (sur la même parcelle) ou les mélanges de peuplements purs diversifiés à l'échelle du paysage (iii) la plantation d'essences autochtones *via* la migration assistée ou d'essences allochtones soit déjà utilisées soit non utilisées en France. Ces stratégies doivent être complétées par des réflexions sur le type de traitement sylvicole approprié (calendrier et intensité des éclaircies, durée des révolutions, densité des arbres...) Face à ces problématiques, le gouvernement a mis en place un plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC, 2011). Pour les forêts, ce dernier vise entre autres à diversifier les ressources génétiques des arbres et à accompagner les propriétaires et gestionnaires forestiers en les incitant à planter dès aujourd'hui des essences supportant les conditions climatiques actuelles et potentiellement adaptées aux conditions climatiques futures. Sur l'ensemble du territoire, les gestionnaires forestiers publics et privés s'interrogent notamment sur le choix des essences et le type de traitement sylvicole les plus adaptés au changement climatique et attendent des réponses de la recherche scientifique (Riou-Nivert, 2008).

Pour déterminer les essences forestières potentiellement adaptées au changement climatique, il est nécessaire de connaître leur autécologie, définie comme la science des réponses biologiques des espèces aux facteurs abiotiques (climat, sol...). En France, l'autécologie a été décrite à partir des études de relations station¹-production qui ont vu le jour dans les années 1970 (Garbaye *et al.*, 1970 ; Becker, 1972 ; Becker et Le Goff, 1988). Ces études visaient à l'établissement des relations, généralement, entre la hauteur de la strate dominante à différents âges (25, 50 et 100 ans) et les caractéristiques abiotiques de la station (fertilité du sol, topographie, alimentation hydrique...). Les études station-production ont pu s'appuyer sur les nombreux catalogues de stations forestières (p. ex. Becker *et al.*, 1980) qui ont été réalisés au cours des dernières décennies et qui présentent l'inventaire de tous les types de stations présents dans une région naturelle ainsi que leur description précise. Pour la prise en compte du changement climatique, il apparaît essentiel de rénover ces approches:

- en incluant différentes variables biologiques (de phénologie, physiologie, distribution...) reliées quantitativement aux facteurs abiotiques, indépendamment de la station ;
- en quantifiant les seuils biologiques de réponse des essences aux facteurs abiotiques ;
- en élaborant des outils informatiques opérationnels.

Depuis plus d'une décennie, plusieurs pays européens (Royaume-Uni, Autriche, Belgique, Danemark, Pays-Bas) développent des outils d'aide à la décision à destination des

¹ Une station est étendue de terrain de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques : mésoclimat, topographie, composition floristique et structure de la végétation spontanée, sol.

gestionnaires. Ces outils intègrent l'autécologie des essences forestières afin de préconiser des stratégies adaptatives de gestion forestière. Parmi les 75 outils qui sont actuellement listés dans l'action COST européenne FORSYS (2009-2013), un seul est recensé pour la France (Capsis). Capsis est une plateforme de développement de modèles de croissance et de dynamique forestière qui est utilisé par exemple lors de l'établissement de guides de sylvicultures par l'ONF. A l'heure actuelle, seul un nombre restreint de modèles qu'il intègre prennent en compte l'impact du changement climatique, même si leur nombre tend à augmenter.

Dans ce contexte, l'élaboration d'un outil d'aide au choix des essences et au traitement sylvicole associé (durée de révolution, densité des peuplements...) en France, avec une interface simplifiée pour les gestionnaires, semble rapidement nécessaire. Pour faciliter la réalisation de cet objectif, le présent document se propose :

1. d'examiner les définitions et les contours de l'autécologie afin d'appréhender au mieux ce qu'elle recouvre ;
2. d'analyser les principaux outils d'aide à la décision existants qui intègrent l'autécologie des essences forestières dans le contexte du changement climatique et d'identifier leurs points forts et leurs limites ;
3. d'établir un cahier des charges pour élaborer un outil d'aide au choix des essences et au traitement sylvicole associé en France métropolitaine dans le contexte du changement climatique.

Cette synthèse est alimentée par les réflexions issues du projet Traitaut (Traits fonctionnels et autécologie des essences forestières) qui s'est déroulé en 2012 et qui a été co-financé par le Groupement d'Intérêt Public (GIP) Ecofor et le Réseau Mixte Technologique (RMT) Aforce. Ce projet, coordonné par Alice Michelot (chef de projet), a été encadré par Sophie Gachet, Myriam Legay et Guy Landmann (co-responsables scientifiques). Il a également permis la création d'un site internet : <http://traitaut.gip-ecofor.org> qui contient un annuaire des membres, une base de sources bibliographiques, un recensement des outils sur l'autécologie et un espace d'échanges sur les projets et travaux en lien avec Traitaut. Actuellement, 60 personnes se sont inscrites dans l'annuaire de compétences du site Traitaut et la base de données contient 35 sources bibliographiques.

I. Définitions

Cette première partie est consacrée à la clarification des concepts et des définitions autour de l'autécologie afin d'appréhender au mieux ce qu'elle recouvre. Au fil de cette analyse, nous mettons en évidence la difficulté de trouver une définition partagée de l'autécologie et la nécessité de préciser ces différents domaines. De plus, nous décrivons les différents facteurs abiotiques qui peuvent influencer l'autécologie des essences forestières et leurs types de réponses biologiques. Cette partie illustre la diversité des facteurs et des réponses qu'il est possible d'étudier et les différentes échelles spatio-temporelles concernées.

1. L'autécologie

Au regard des différentes définitions utilisées en sciences forestières, il nous a semblé important de clarifier la signification du terme « autécologie » au sens strict. Le sens et l'usage de ce terme ont largement évolué au cours du temps. Historiquement, le mot « autécologie » aurait été employé pour la première fois par le botaniste autrichien Gottlieb Haberlandt en 1884 dans son livre « Physiological Plant Anatomy » pour désigner l'étude des relations entre un individu ou une espèce et l'environnement (Bugslag, 1968). Ensuite Pierre Dansereau, écologue québécois, est l'un des premiers à détailler les principes de la division de l'écologie en « autécologie » et « synécologie » dans « Biogeography: an Ecological Perspective » paru en 1957. L'autécologie est en effet complémentée par la synécologie qui étudie, elle, les interactions biotiques entre différentes espèces vivant dans le même milieu. L'autécologie a donc été utilisée en physiologie puis en biogéographie en la reliant aux capacités d'adaptation des espèces, sans considérer les interactions biotiques avec leur milieu. L'étymologie du mot « autécologie » par sa racine « auto » montre que l'on s'intéresse à une espèce indépendamment de sa localisation et des autres êtres vivants qui l'entourent (ou biocénose). En France, ce terme est notamment repris en sciences forestières depuis quelques décennies avec parfois des confusions dans sa définition. Ces confusions, que nous allons mettre en évidence, sont principalement dues à l'évolution historique de sa signification selon les domaines d'application et le développement des concepts de l'écologie et notamment de la description des différents niveaux d'organisation du vivant (**tableau 1**).

Tableau 1. Niveaux d'organisation du vivant dans un ordre croissant d'intégration, correspondant à différents domaines de l'écologie.

<u>Niveau d'organisation</u>
Organe
Individu
Population
Espèce
Communauté
Paysage

D'après Delpech *et al.* (1985) l'autécologie est : « la partie de l'écologie étudiant les relations entre les populations ou les espèces, considérées isolément, et leur environnement ». Il est ainsi considéré deux niveaux d'organisation : l'espèce et la population. La population est définie actuellement comme l'ensemble des individus d'une même espèce vivant dans le même milieu. Au sens littéral, il semble donc que l'autécologie ne concerne pas le niveau « population » puisqu'elle considère l'espèce indépendamment de sa localisation et de sa biocénose. Le terme « environnement » sous-entend quant à lui des interactions biotiques et abiotiques alors que l'autécologie considère uniquement les interactions abiotiques, ce qui la différencie notamment de la synécologie comme nous l'avons rappelé précédemment.

Plus récemment, Masson (2005) a défini l'autécologie comme : « l'étude des relations entre une espèce et son milieu, afin de préciser ses préférences écologiques et ses limites de tolérance vis-à-vis des différents facteurs du milieu ». Ici encore, le terme « facteurs du milieu » mêle composantes abiotiques et biotiques. Cette définition est cependant plus précise concernant le type de réponse de l'espèce qui va être décrit, à savoir ses préférences écologiques et ses seuils de tolérance aux facteurs. Masson ajoute que « l'autécologie ambitionne également d'expliquer le mode d'action de ces facteurs ». Plus précisément, il apparaît que l'autécologie étudie la réponse de l'espèce aux facteurs plutôt que le mode d'action de ces facteurs. Par exemple, on cherche à déterminer si la croissance radiale (réponse) d'une espèce est faible ou forte à une température annuelle moyenne de 15°C et non pas directement le mécanisme par lequel la température va influencer cette croissance.

Dans la définition de Bastien et Gauberville (2011) l'action des facteurs est également considérée comme l'objet de l'étude : « l'autécologie est l'étude de l'action du milieu sur la morphologie, la physiologie et le comportement d'une espèce. L'autécologie définit essentiellement les limites de tolérance et les préférendums des espèces considérées isolément vis-à-vis des divers facteurs écologiques ». Le terme « facteur écologique » évoque comme dans les définitions citées précédemment des agents biotiques et abiotiques susceptibles d'agir directement sur le fonctionnement des être vivants.

Larrieu *et al.* (2012) désignent par autécologie « les exigences stationnelles des espèces ». Cette définition fait référence au terme « station » qui est, pour rappel, une étendue de terrain de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques : mésoclimat, topographie, composition floristique et structure de la végétation spontanée, sol (Bastien et Gauberville, 2011). On peut s'interroger sur la composition floristique et la structure de la végétation spontanée qui sont ici considérées comme des facteurs écologiques mais qui sont également des réponses à un facteur donné. Il en est de même pour tous les facteurs biotiques : insectes, champignons, herbivores, organismes symbiotiques... qui peuvent aussi indiquer une réponse à un facteur abiotique. Le terme « exigences » semble quant à lui un peu difficile à délimiter. Il sous-entend les préférences écologiques de chaque espèce en termes de facteurs abiotiques avec des seuils quantitatifs au delà desquelles les espèces ne sont plus adaptées à leur milieu.

Pour notre étude, nous souhaitons nous appuyer sur la définition de Frontier et Pichod-Viale (1993). L'autécologie y est décrite comme : « la science des réponses biologiques des espèces ou autres taxons aux caractères physico-chimiques de l'environnement, en fonction de leurs physiologies propres et de leurs adaptations potentielles ». Deux confusions subsistent cependant dans cette définition. Le terme « caractère » peut être remplacé par « facteur » pour signifier une action directe sur la biologie des espèces et le niveau d'organisation auquel s'est intéressé initialement l'autécologie : « l'espèce ». D'ailleurs, il existe peu de descriptions autécologiques pour un genre, une famille ou un taxon de rang supérieur, probablement parce qu'il est plus difficile de trouver une homogénéité de réponses aux facteurs abiotiques à ces niveaux d'organisation. Nous proposons donc pour la suite de ce document de définir l'autécologie comme : « **la science des réponses biologiques de chaque espèce aux facteurs abiotiques** ». Le terme « réponse » regroupe toutes les réactions des espèces aux facteurs, quelles soient qualitatives ou quantitatives. Les termes « physiologies propres et adaptations potentielles » ont été volontairement supprimés puisque la réponse des espèces est intrinsèquement dépendante de leurs caractéristiques physiologiques, morphologiques et génétiques qui conditionnent leur adaptation potentielle.

Cette recherche sémantique met en évidence plusieurs éléments fondamentaux probablement à l'origine des confusions sur l'usage du terme autécologie et qu'il faut garder en mémoire pour la suite de notre réflexion. L'autécologie devait initialement permettre d'expliquer la répartition des espèces à différentes échelles spatiales. Rapidement, comme le soulignent Frontier et Pichod-Viale (1993), repris par Gaudin (1997), elle a buté sur un obstacle : la répartition d'une espèce est non seulement due à des facteurs abiotiques, mais également aux interactions biotiques avec les autres espèces du milieu (relations interspécifiques) et les individus de la même espèce (relations intra-spécifiques). Par exemple, les mycorhizes qui sont des associations symbiotiques entre les racines végétales et des champignons peuvent favoriser la croissance d'une essence forestière. A l'inverse, une densité importante d'herbivores dans le milieu peut diminuer la régénération d'une espèce. Pour pallier à ces limites, il s'est avéré essentiel de compléter l'approche autécologique par la synécologie que nous définirons comme : « la science des interactions biotiques entre différentes espèces vivant dans le même milieu » et d'y ajouter les interactions intra-spécifiques.

L'autécologie, dans son acception initiale, est un concept qui ne permet pas à lui seul de rendre compte de la répartition des espèces. C'est probablement ce constat qui a incité les forestiers à étendre ce concept. Ainsi, dans certaines définitions précitées de l'autécologie, la réponse biologique des espèces aux facteurs biotiques comme les insectes ou les champignons est mentionnée. Des confusions sur le niveau d'organisation du vivant sont également présentes car la restriction à l'espèce constitue une limite. Les forestiers veulent aussi étudier l'autécologie selon les variétés génétiques pour mieux prendre en compte l'adaptation potentielle des espèces. Ces limites amènent à penser que l'autécologie n'est qu'une première étape pour le choix des essences futures et qu'il faut tendre à intégrer l'ensemble de l'écosystème et ces multiples interactions pour établir une gestion tenant compte du changement climatique.

2. Les facteurs abiotiques

De nombreux facteurs écologiques peuvent influencer le fonctionnement des essences forestières. D'après Bastien et Gauberville (2011), les facteurs écologiques sont des agents physiques, chimiques ou biologiques de l'environnement susceptibles d'avoir une influence directe sur le comportement, le métabolisme ou la répartition des êtres vivants. Parmi eux, deux types sont distinguables :

- les facteurs biotiques qui sont liés aux organismes vivants et aux différents processus dont ils sont responsables ;
- les facteurs abiotiques qui sont les facteurs physico-chimiques d'un milieu.

Ces deux types de facteur ne sont pas indépendants l'un de l'autre. En effet, les facteurs biotiques peuvent influencer les facteurs abiotiques et inversement. Par exemple, l'intensité lumineuse (facteur abiotique) qui arrive jusqu'à un arbre forestier peut être fortement atténuée lorsque l'indice foliaire du peuplement (facteur biotique) est élevé.

En autécologie, *stricto sensu*, on s'intéresse uniquement aux facteurs abiotiques même si certaines approches élargies décrivent également la réponse des espèces aux facteurs biotiques, notamment aux pathogènes. Dans l'objectif futur de rassembler les données autécologiques nécessaires à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision, nous avons répertoriés les principaux facteurs abiotiques pouvant influencer le fonctionnement des essences forestières (**Fig. 1**). Pour cela, nous nous sommes en partie appuyés sur l'ouvrage de Masson (2005) dont le premier tome est consacré à la description de ces facteurs.

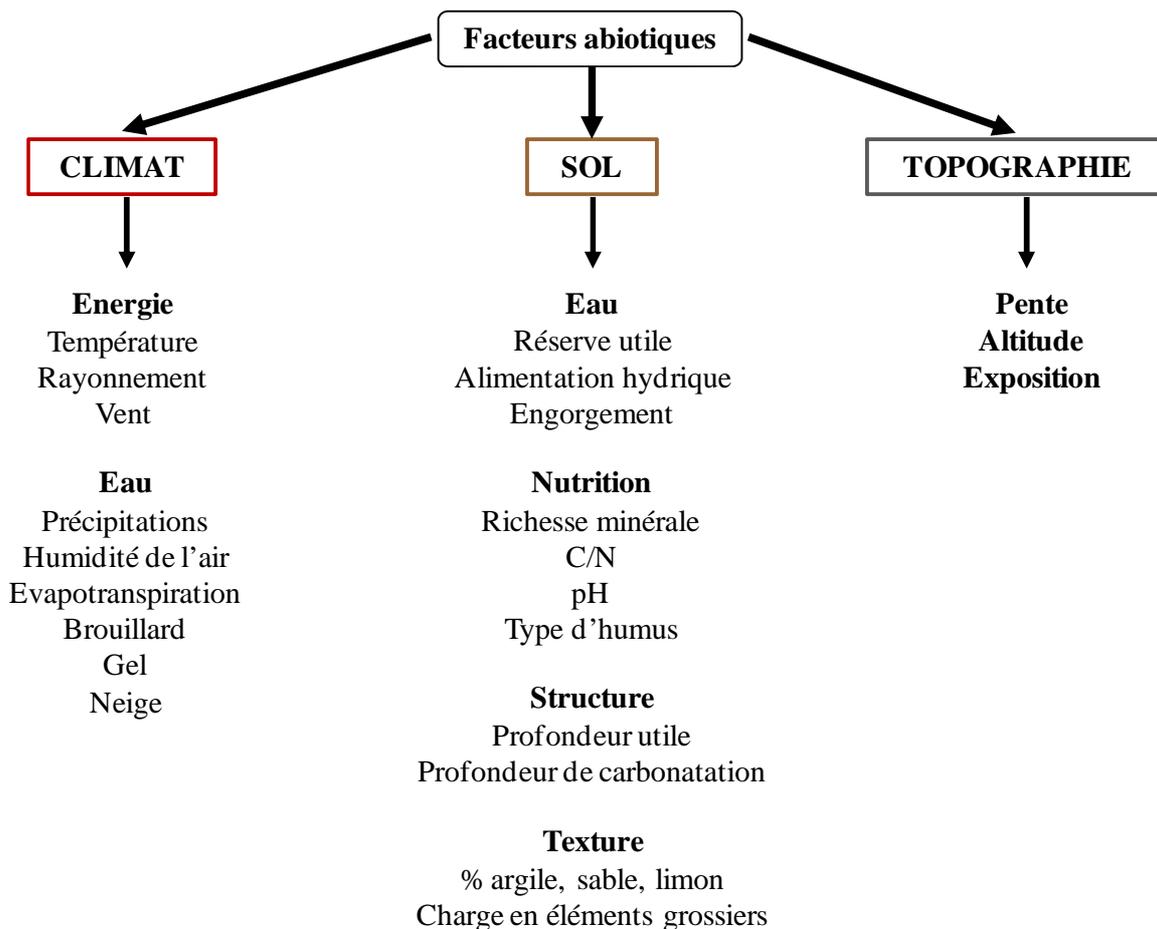


Figure 1. Principaux facteurs abiotiques influençant la réponse des essences forestières, adapté de Masson (2005).

Afin de constituer un outil d'aide à la décision, plusieurs réflexions doivent être menées concernant ces différents facteurs :

- **Comment les hiérarchiser ?** Ils ne semblent pas avoir un degré égal d'influence sur la réponse biologique des essences. Parmi les facteurs climatiques, la température et les précipitations jouent un rôle majeur quelle que soit la saison et leur évolution est largement étudiée dans le cadre du changement climatique (Christensen *et al.*, 2007). L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité maximale d'eau susceptible d'être évapotranspirée sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Sa mesure permet de calculer la différence entre précipitations et ETP durant la saison de végétation, qui indique la demande atmosphérique en eau et qui est renseignée dans des fiches autécologiques publiées récemment (Lemaire, 2011 ; Larrieu *et al.*, 2012). Concernant les facteurs édaphiques, certains ont plus ou moins d'importance selon les espèces. La fertilité du sol ou richesse minérale et l'alimentation hydrique sont des facteurs classiquement décrits en autécologie, notamment via des écogrammes (**Fig. 2**). Ils sont initialement apparus dans la flore forestière française (Rameau *et al.*, 1989). On les trouve également dans des guides de sylviculture étrangers, par exemple en Allemagne (MLUR, 2004).

La hiérarchisation des facteurs est également fonction de la région étudiée. Sur une île par exemple, le vent est un facteur très important à prendre en considération alors qu'il l'est probablement moins que d'autres variables climatiques dans des terres protégées. Certains facteurs peuvent ainsi conditionner l'existence ou la répartition des espèces, il s'agit des facteurs limitants. Ils exercent l'action la plus efficace sur le fonctionnement de l'espèce, en entravant sa croissance ou son développement. Si leur valeur atteint un seuil minimal ou maximal, la vie de l'espèce n'est plus possible. Cette notion de facteur limitant doit son origine à la loi de Justus von Liebig, vers 1850, selon laquelle la croissance d'une plante dépend de l'élément disponible en quantité minimale par rapport à ses besoins, indépendamment de l'abondance des autres éléments. Cette loi a été établie par divers auteurs suite à l'interprétation de l'ouvrage « Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture » (Liebig, 1844) qui développe la théorie de la nutrition végétale des plantes.

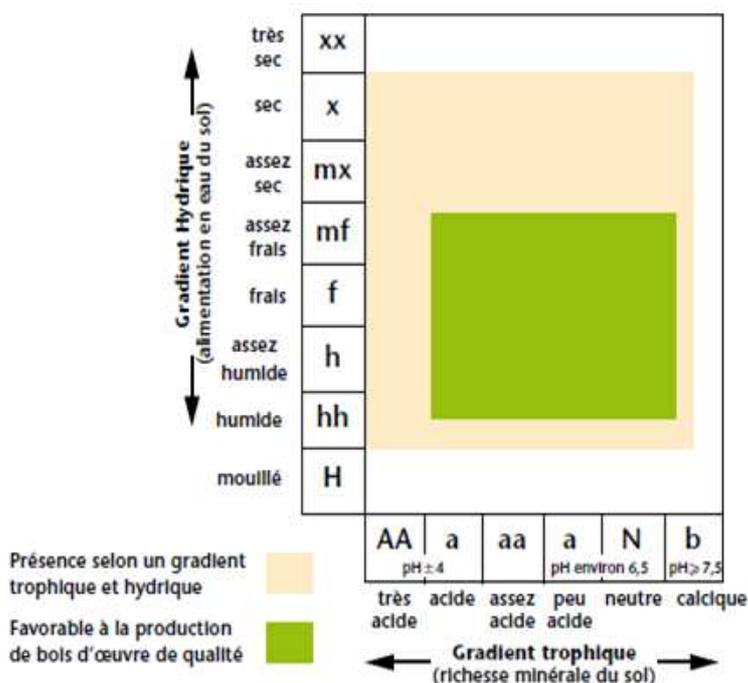


Figure 2. Ecogramme du Chêne pédonculé (Lemaire, 2011) d'après Rameau et al. (1989).

- **Peut-on les quantifier ?** Pour obtenir les fonctions de réponse des espèces aux facteurs et leurs seuils de vulnérabilité, il est nécessaire qu'ils soient quantifiables soit sous forme de valeurs numériques, soit sous forme de gradient comme c'est le cas pour la fertilité minérale et l'alimentation hydrique dans les écogrammes. Dans ce deuxième cas de figure, une échelle relative de valeurs peut leur être attribuée. Cette quantification permet également de faire évoluer les valeurs des températures et des précipitations en fonction des scénarios futurs qui en donnent des évolutions chiffrées. Le type d'humus est un facteur qualitatif par exemple mais pour le décrire quantitativement on peut utiliser le rapport C/N qui donne une indication sur la vitesse de décomposition de la litière.

- **Comment les mesurer ?** Pour les facteurs climatiques, différentes variables peuvent être mesurées : la valeur moyenne, minimale, maximale ou la variabilité (p. ex. écart-type,

variance). Elles sont mesurées à des pas de temps plus ou moins fins, de dix à vingt mesures par seconde dans le cas des tours à flux par exemple et sont intégrées sur la journée ou la demi-journée généralement. Ces variables sont ensuite cumulées ou analysées sur différentes périodes en fonction de leur pertinence vis-à-vis de l'autécologie des essences : l'année, la saison (été, hiver...), la saison de végétation, la saison de croissance ou le mois. A ces mesures quantitatives s'ajoutent des mesures de fréquence ou de durée des épisodes climatiques plus ou moins extrêmes ; par exemple, combien de jours dans l'année la température moyenne journalière a dépassé 35°C (fréquence) ou combien de jours consécutifs la température a dépassé 35°C au cours de l'été 2003 (durée). Dans ces mesures, la notion de seuil climatique est très importante et les essences vont être plus ou moins tolérantes aux extrêmes. Ainsi, à l'effet du climat moyen comme la tendance à l'augmentation de la température, s'ajoute l'effet des évènements extrêmes qui, selon leur fréquence, leur intensité ou leur durée, peuvent influencer la réponse biologique des essences forestières. Une synthèse récente de Reyer *et al.* (2012) souligne d'ailleurs que l'impact des évènements climatiques extrêmes sur la phénologie des plantes est beaucoup moins étudié que l'effet du climat moyen. Ils montrent que les relations hydriques de la plante sont fortement influencées par les extrêmes climatiques, notamment *via* les précipitations et les températures, et que les vagues de chaleurs et les inondations ont plus d'impact sur les processus physiologiques que l'évolution moyenne du climat.

- **A quelle échelle spatiale les appréhender ?** Les facteurs abiotiques sont mesurés à une échelle spatiale donnée. Généralement, les modèles d'évolution climatique fonctionnent à une résolution spatiale de plusieurs dizaines de kilomètres et sont paramétrés à l'échelle du territoire. Pour être utilisés à l'échelle régionale, ils doivent être régionalisés à des échelles plus fines de l'ordre de 10 km *via* des méthodes de désagrégation statistique ou des modèles climatiques régionaux. Le projet Climator (Brisson et Levrault, 2010) a mis en évidence les incertitudes liées aux méthodes de désagrégation du climat futur. En France, des travaux récents de Piedallu *et al.* (2009) ont permis d'éditer des cartographies multi-couches avec différents facteurs abiotiques à l'échelle kilométrique. Pour adapter la gestion forestière au changement climatique, les gestionnaires ont besoin de facteurs abiotiques mesurés ou calculés à une échelle locale à maille encore plus fine, de l'ordre de l'hectare. Cette diminution d'échelle entraîne cependant des biais et des incertitudes sur l'estimation spatialisée des facteurs qui sont à l'heure actuelle difficilement quantifiables. Ces incertitudes viennent s'ajouter à toutes celles qui existent par ailleurs du fait des scénarios socio-économiques, des scénarios de climat et d'émissions de gaz à effet de serre, des modèles climatiques globaux et des modèles de végétation.

3. Les réponses biologiques

Le terme « réponse biologique » a été volontairement retenu dans notre définition de l'autécologie car il recouvre toutes sortes de changements (c.-à-d. physiologiques, morphologiques, comportementaux...) d'une espèce sous l'impact des facteurs écologiques. Les mesures de productivité (production d'un peuplement forestier ramenée à l'unité de temps) ne suffisent pas à caractériser toutes les réponses d'une espèce à son milieu. Dans la

figure 3, nous avons tenté de regrouper et d'organiser les différentes réponses biologiques des espèces aux facteurs abiotiques ainsi que les mesures pour les quantifier. Contrairement à Masson (2005), nous avons considéré la durée de la saison de végétation comme une réponse biologique de l'espèce et non pas comme un facteur.

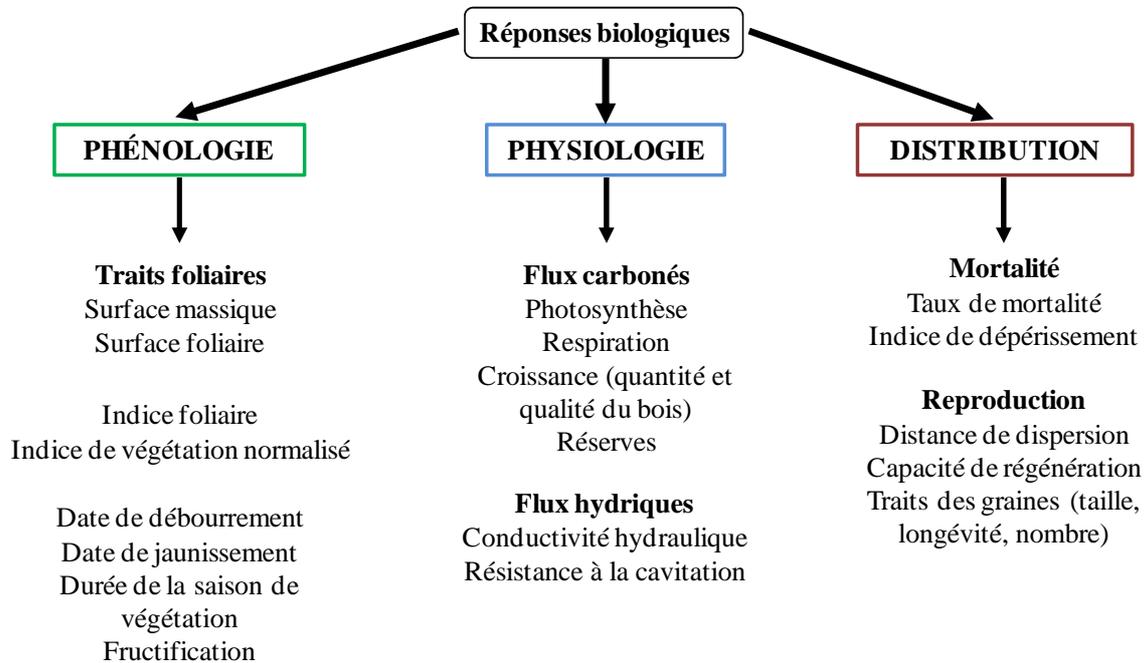


Figure 3. Principales réponses biologiques des essences forestières aux facteurs abiotiques.

Pour chaque essence, il est pertinent de rechercher **la fonction de réponse** pour chaque facteur (**Fig. 4**). Elle fournit les valeurs d'une réponse biologique pour la gamme des valeurs du facteur considéré. Les approches pour caractériser l'ensemble des réponses des essences à leur environnement peuvent être multiples :

- les études de **relations station-production** fournissent des informations sur la réponse de production des espèces en fonction des facteurs abiotiques ;
- l'**écophysiologie** permet de déterminer les flux de carbone et d'eau à l'échelle de l'individu ou du peuplement ;
- la **dendrochronologie** peut être utilisée pour analyser rétrospectivement l'impact des facteurs environnementaux et en particulier climatiques sur la croissance radiale ;
- les **traits fonctionnels**, généralement étudiés à l'échelle des communautés, peuvent être des mesures quantitatives en lien avec la phénologie (traits foliaires) ou la distribution des espèces (traits des graines) ;
- la **téledétection** est utilisable pour obtenir des informations à une échelle spatiale plus large (massif forestier) et pour mesurer des indicateurs du dépérissement ;
- l'**expertise** des différents acteurs de la gestion forestière sur les essences, basée sur des observations de terrain, peut compléter les informations disponibles pour réaliser les fonctions de réponses. Le projet Nomades (Nouvelles méthodes d'acclimatation des essences forestières, 2011), financé par le RMT Aforce a par exemple permis d'établir des fiches pour chaque essence avec des notes de A (excellent) à D (médiocre) pour chaque type de réponse biologique à partir des dires d'experts.

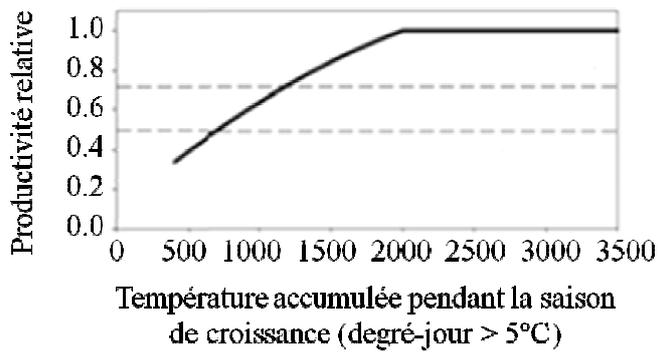


Figure 4. Exemple de fonction de réponse : productivité relative (productivité observée divisée par la productivité maximale d'après Edwards et Christie, 1981) en fonction de la température accumulée pendant la saison de croissance pour *Picea sitchensis* (Ecological site classification).

Ces mesures de réponses permettront de déterminer les exigences, les préférences ou les seuils de vulnérabilité de chaque essence pour chaque facteur. Il est primordial de prendre en compte à la fois les réponses à court et long termes. Par exemple, la croissance du Hêtre semble très sensible à une sécheresse estivale mais peut rapidement revenir à la normale l'année suivante (Dittmar *et al.*, 2003). Au contraire, une chute de croissance du Chêne lors d'une année sèche peut avoir des conséquences sur la croissance des années suivantes. La réponse du Hêtre en termes de croissance est donc plus résiliente que celle du Chêne (Michelot *et al.*, 2012).

Les réponses biologiques sont également susceptibles d'évoluer au cours du temps en fonction de l'adaptation des espèces. Il est donc nécessaire d'inclure des approches de génétique pour mieux déterminer les caractères héréditaires et la provenance des essences. La plasticité de leur réponse pourra être prise en compte *via* des probabilités de risque face au changement climatique, dérivées des approches d'économie.

Enfin, n'oublions pas qu'à ces réponses propres à une espèce, étudiées en autécologie, s'ajoute également des incidences sur la communauté, à considérer dans son ensemble. Par exemple, les facteurs climatiques peuvent influencer la biodiversité des peuplements forestiers ce qui peut avoir des répercussions sur le fonctionnement du sol, de la strate herbacée ou des populations animales.

II. Les outils d'aide à la décision intégrant l'autécologie

En France, depuis près d'un demi-siècle, les gestionnaires ont pu s'appuyer sur les relations station-production qui relie la hauteur de la strate dominante à différents âges et les caractéristiques abiotiques de la station. Parallèlement, les catalogues de stations forestières ont été très largement développés. Ils décrivent le sol et la végétation des stations forestières sur une étendue spatiale locale (massif ou ensemble de massifs) et l'adéquation des essences à ces stations forestières en analysant les facteurs favorables et limitants (p. ex. Party et Beaufile, 2010). Des guides de choix des essences ont également été élaborés pour aider les gestionnaires *via* un effort de simplification de présentation par rapport aux catalogues forestiers (Forêt et Dumé, 2006). Ils mentionnent les stations ayant les mêmes potentialités pour les principales essences d'une région ainsi que la fertilité des sols, les habitats et les dynamiques de végétation des stations (p. ex. Reboul, 2011). Aussi bien dans les catalogues que dans les guides simplifiés, l'effet des gradients abiotiques sur les essences n'est pas renseigné quantitativement ce qui demeure une limite pour établir des stratégies adaptatives au changement climatique et à l'incertitude des scénarios futurs. Ces dernières années en France, des recherches ont été engagées pour transposer les connaissances autécologiques sur les essences forestières en système d'aide à la décision intégrant le changement climatique. On peut citer par exemple les travaux du Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois (LERFoB) qui spatialisent les facteurs édaphiques et climatiques à partir de la bio-indication des plantes à des mailles spatiales fines (p. ex. carte du pH des sols à une résolution spatiale de 1 km, Gégout, 2008). A l'étranger, nous avons trouvé des outils informatiques d'aide à la décision relativement opérationnels qui visent à appuyer les gestionnaires et à les conseiller en termes de stratégies adaptatives face au changement climatique.

Pour atteindre l'objectif principal de cette synthèse, à savoir proposer un cahier des charges pour mettre en place un outil d'aide à la décision prenant en compte le changement climatique, nous avons analysé les outils existants dans les pays étrangers. Ces sont finalement cinq outils qui intègrent des éléments d'autécologie qui seront présentés dans cette deuxième partie. Ce travail s'appuie en partie sur la synthèse réalisée par Reynolds *et al.* (2008) et le wiki de l'action COST européenne FORSYS (<http://fp0804.emu.ee>) qui vise à rassembler les informations et les processus fondamentaux pour la prise de décision en vue d'une gestion durable et multifonctionnelle des forêts. Les cinq outils peuvent généralement prendre en compte le changement climatique et intègrent des connaissances sur la réponse des essences forestières aux facteurs écologiques. Des schémas simples et des synthèses ont été réalisés pour expliciter le fonctionnement des différents outils à partir des publications scientifiques qui les décrivent. A l'issue de chaque présentation, nous évaluerons les points forts et les limites de l'outil. Ce sont ces éléments qui seront repris dans la troisième partie du document afin de constituer le cahier des charges nécessaire au fondement d'un outil français d'aide à la décision.

1. AFFOREST

1.1. Description

Le logiciel d'aide à la décision AFFOREST (Gilliams *et al.*, 2004 ; Gilliams *et al.*, 2005) est issu d'un projet européen de quatre ans du 5ème Programme-cadre pour la recherche et le développement technologique (2000-2004). Il a regroupé des chercheurs de quatre pays : Suède, Danemark, Pays-Bas et Belgique. Son objectif est de **tester l'effet du boisement sur des terres agricoles**. Il est destiné aux décideurs politiques et aux gestionnaires forestiers à l'échelle locale et régionale c'est pourquoi il peut être utilisé à deux échelles spatiales (1 ha ou 1 km²). Sa structure est composée d'un métamodèle (Very Small Afforestation Model : VSAM), d'un système d'information géographique (SIG) et d'une interface utilisateur. Son fonctionnement est représenté schématiquement dans la **figure 5**.

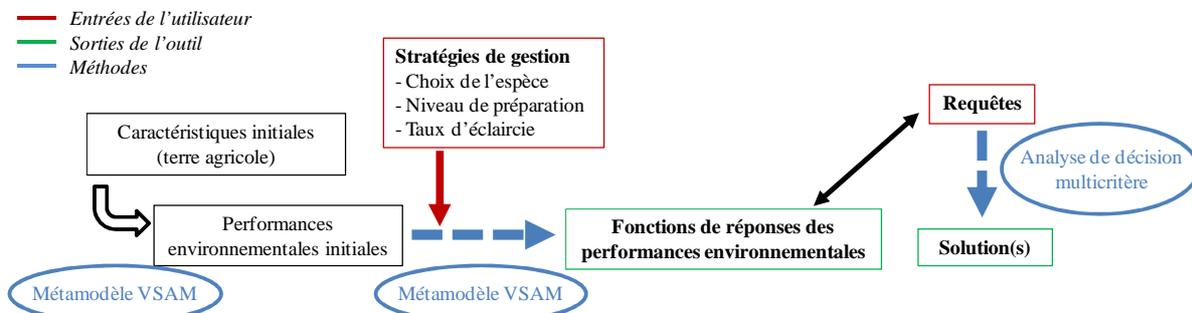


Figure 5. Schéma général du fonctionnement de l'outil AFFOREST.

Trois types de stratégies sont renseignés par l'utilisateur :

- le choix d'une espèce parmi quatre qui sont *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Quercus robur* et *Fagus sylvatica*. Selon la qualité du site, définie par une classe de climat et trois paramètres édaphiques (texture, drainage et profondeur du sol), le logiciel fournit un indice d'adaptation de l'espèce au site d'après des tables de production et des observations de terrain. Si l'espèce n'est pas adaptée au site, l'utilisateur doit en choisir une autre ;
- le niveau de préparation du site (faible, moyen ou fort) qui dépend du labour, de la fertilisation et du contrôle de la végétation au sol ;
- le niveau d'éclaircie (taux faible, moyen ou fort).

Les paramètres d'entrée du système initial (terre agricole), déjà stockés dans l'outil, sont le type de sol, la moyenne annuelle de la quantité de précipitations, la moyenne annuelle des dépôts d'azote atmosphérique et le type d'utilisation des terres. Ils ont permis de déterminer en amont les valeurs initiales (au temps 0) de **trois performances environnementales** : séquestration du carbone ($\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$), lessivage des nitrates ($\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$) et recharge en eau du sol (m ha^{-1}) à l'aide du **métamodèle VSAM**. VSAM est issu du modèle mécaniste SMART2 qui simule les processus fonctionnels et les cycles de nutriments du sol (cf. Kros, 2002). A partir des stratégies et des paramètres initiaux, le métamodèle VSAM simule la réponse des trois performances environnementales au cours du temps (p. ex. **Fig. 6**). Les

sorties sont présentées sous forme de tableau mais également visualisables sur une carte grâce à la plateforme SIG.

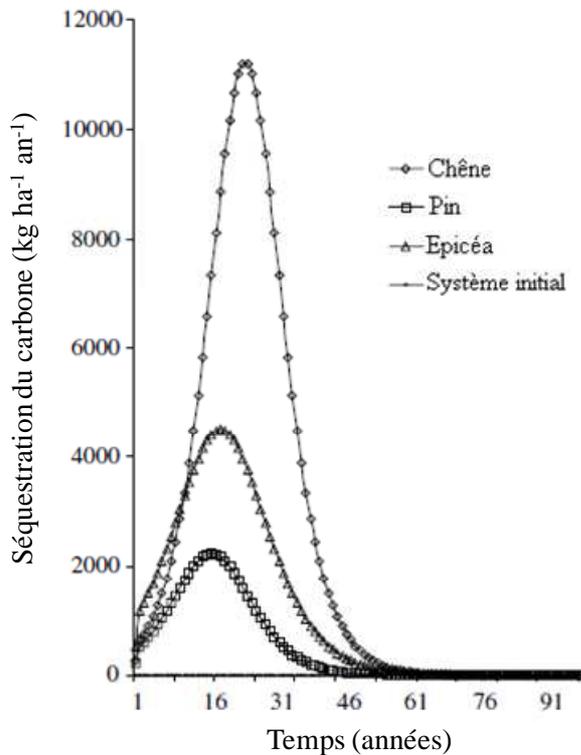


Figure 6. Séquestration du carbone au cours du temps selon les espèces plantées (d'après Gilliams *et al.*, 2005).

Le module correspondant à la prise de décision est indépendant de la base de données spatialisée. Les demandes de l'utilisateur sont transformées en langage de requête structurée (SQL) et peuvent concerner : la localisation, les valeurs quantitatives, la stratégie de boisement ou la durée de simulation. Pour les questions complexes qui nécessitent une évaluation (p. ex. quelle est la stratégie de boisement qui permet d'avoir la plus forte séquestration de carbone et le plus faible taux de nitrates lessivés ?), une **analyse de décisions multicritère** est réalisée. La méthode employée est la « programmation par l'objectif » qui consiste à minimiser les écarts entre les valeurs simulées et les valeurs ciblées des objectifs par l'utilisateur selon les stratégies.

1.2. Points forts

- Cet outil présente l'avantage de considérer plusieurs services écosystémiques (séquestration du carbone, limitation de la pollution des nitrates dans le sol et recharge en eau du sol), orientés sur trois cycles fondamentaux : carbone, azote et eau.
- Les développeurs ont pu utiliser un **modèle mécaniste** déjà construit grâce à une simplification de celui-ci en métamodèle. Les fonctions de réponses permettent de décrire quantitativement les processus et pourraient donc prendre en compte l'évolution du climat.

- Il est possible de simuler ces fonctions à deux échelles spatiales, ce qui permet à l'outil d'apporter des informations à la fois aux gestionnaires locaux mais également aux décideurs à l'échelle régionale.
- Sa structure sous forme de **modules séparés** offre différentes sorties aux utilisateurs (valeurs quantitatives et solutions multicritères). En outre, le module d'analyse de décisions multicritères permet de proposer des réponses à la fois aux requêtes simples et à celles qui sont plus complexes.

1.3. Limites

- Cet outil nécessite une paramétrisation relativement forte donc une bonne connaissance du site d'étude, notamment du sol.
- Dans le métamodèle, les réponses autécologiques considérées dépendent essentiellement des processus fonctionnels du sol qui est décrit comme une seule couche.
- Concernant le choix des essences futures, l'outil propose **seulement quatre essences forestières** (deux conifères et deux feuillus) et leur vulnérabilité est estimée par leur croissance obtenue *via* des tables de production et des dires d'experts. Pour prédire cette vulnérabilité, le climat est classé par type. Les possibilités d'évolution de ce paramètre en fonction du changement climatique semblent donc limitées.
- **Aucun scénario de changement climatique** n'est pris en compte dans cet outil.

2. Decision Support Dobrova (DSD)

2.1. Description

Le logiciel DSD (Lexer *et al.*, 2005) a été développé par les chercheurs de l'Université des ressources naturelles et des sciences de la vie, en Autriche (Universität für Bodenkultur Wien), afin d'appuyer l'action de l'administration forestière auprès des gestionnaires privés. La première version a été créée en 2001. Cet outil a été établi à une échelle locale (région de Dobrova, au sud de l'Autriche) à destination des gestionnaires forestiers. Il vise à les accompagner dans la conversion des peuplements de *Pinus sylvestris* et *Picea abies* (vulnérables à la sécheresse, aux tempêtes et aux pathogènes) en peuplements mixtes de feuillus et conifères. L'objectif de cet outil est (1) de **choisir l'espèce et le type de peuplement** les moins vulnérables au changement climatique et aux risques futurs (2) d'**identifier la gestion sylvicole la plus adaptée** à ces futures conditions. Sa structure est composée d'un modèle de croissance, d'un système d'interface graphique et d'une base de données. Son schéma général est présenté dans la **figure 7**.

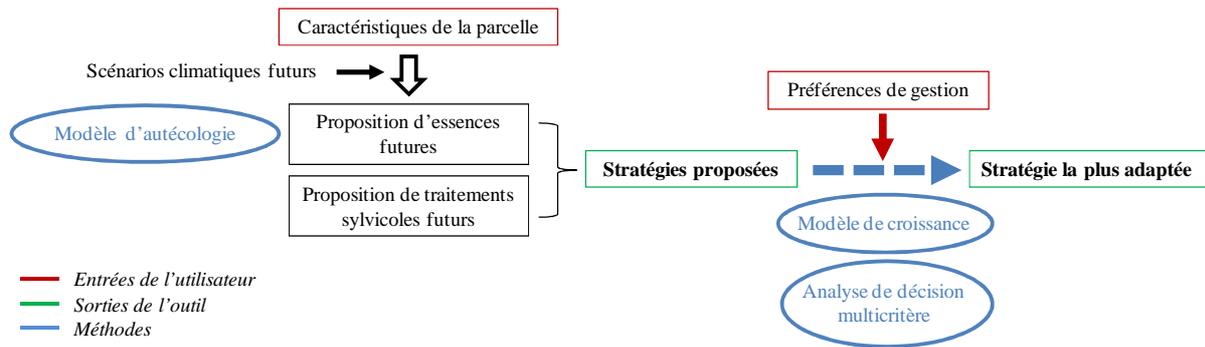


Figure 7. Schéma général du fonctionnement de l'outil DSD.

Sa construction étant relativement complexe, nous allons expliciter les six principales étapes de son utilisation :

a. Caractériser le site et le peuplement

L'utilisateur identifie son site parmi cinq grands types rencontrés dans cette région. Il choisit un scénario climatique pour 2050 parmi deux (Houghton *et al.*, 1996) et un seuil de vulnérabilité future des espèces (faible, modéré ou fort). Il obtient ainsi une liste de peuplements futurs potentiellement adaptés au changement climatique sur son site d'après un **modèle autécologique** de Steiner et Lexer (1998) donnant l'adéquation de l'espèce suivant la température, l'humidité du sol et la fertilité minérale. Ensuite, il caractérise son type de peuplement actuel parmi les 27 types prédéfinis dans la base de données d'après des mesures de : la proportion de *Pinus sylvestris* et *Picea abies* en surface terrière, la hauteur dominante, la classe de rendement de l'espèce dominante, des indicateurs qualitatifs sur la régénération naturelle et l'ouverture de la canopée. La croissance des peuplements actuels et potentiels est simulée par le **modèle de croissance MOSES** (Hasenauer *et al.*, 1995), construit à partir des publications dans le domaine de la sylviculture et des expériences de gestion. Une simulation d'évolution de la hauteur des essences en sous-étage en fonction de la lumière est également implémentée à ce modèle.

b. Définir les préférences de gestion

Les utilisateurs formalisent leurs préférences de gestion grâce à la méthode de Saaty (1977) basée sur des comparaisons par paire. Elle permet d'attribuer une importance relative à chacun des **trois objectifs de gestion** qui sont : la production de bois, la conservation de la nature et de la biodiversité et le maintien ou l'amélioration de la productivité du site.

c. Sélectionner les types de traitements sylvicoles

Selon les caractéristiques du site et du peuplement actuel, l'utilisateur choisit des traitements sylvicoles futurs dans une liste qui lui est proposée. Ces traitements sont adaptés au site et également compatibles avec les espèces des peuplements futurs qui ont été indiqués dans l'étape 1. Ainsi, l'utilisateur a sélectionné plusieurs stratégies futures avec une combinaison différente de choix d'espèces et de traitement sylvicole.

d. Calculer la valeur des indicateurs pour chaque stratégie

Une **analyse de décision multicritère** a été développée dans cet outil. Les méthodes employées sont la procédure analytique de hiérarchisation (AHP) et la théorie d'utilité multi-attributs (MAUT). Grâce à l'AHP, le problème est décomposé en sous-éléments. Puis, l'importance relative de chaque élément est évaluée *via* des comparaisons par paire. Ces évaluations sont converties en valeurs numériques qui permettent de calculer un score pour chaque stratégie. La MAUT attribue un rang aux stratégies selon leur score en regard des objectifs à atteindre et aide ainsi l'utilisateur à trouver une solution correspondant à ces préférences.

Pour chaque stratégie, des valeurs d'indicateurs à court terme (30 ans) et à long terme (100 ans) sont calculés à partir de données quantitatives mais également de dires d'experts pour les indicateurs qualitatifs. La liste des indicateurs utilisés pour chacun des trois objectifs est présentée dans le **tableau 2**.

Tableau 2. Liste des indicateurs utilisés pour évaluer la performance des stratégies de gestion selon trois objectifs : la production de bois, la conservation de la nature et le maintien de la productivité du site (d'après Lexer *et al.*, 2005). CMT : court/moyen termes, LT : long terme.

Objectif	Horizon de temps	Critère	Indicateur	Unité	
Production de bois	CMT	Valeur nette actuelle	Flux de trésorerie actualisés et valeur de liquidation après 30 ans	€/ha	
	CMT/LT	Opportunités de marché	Qualitative (par l'utilisateur)	0-1	
	CMT	Neige		Ratio hauteur-diamètre moyen	-
				Ratio houppier moyen	-
				Proportion de <i>Pinus sylvestris</i> en surface terrière	%
				Proportion de <i>Picea abies</i> en surface terrière	%
	CMT	Vent		Hauteur dominante	m
				Ratio hauteur-diamètre moyen	-
				Proportion de <i>Pinus sylvestris</i> en surface terrière	%
				Proportion de <i>Picea abies</i> en surface terrière	%
	CMT/LT	Changement climatique	Changement d'adéquation de l'espèce (calculé d'après Steiner et Lexer, 1998)	0-1	
	CMT	<i>Ips typographus</i>	Proportion de <i>Picea abies</i> par surface terrière	%	
	CMT	<i>Pristiphora abietina</i>		Proportion de <i>Picea abies</i> par surface terrière	%
				Proportion de décidus par surface terrière	%
	Conservation de la nature	CMT	<i>Neodiprion sertifer</i>	Proportion de <i>Pinus sylvestris</i> par surface terrière	%
				Coût de la reforestation et coût en traitements sylvicoles	€/ha
		LT	Neige	Qualitative	-
		LT	Vent	Qualitative (par type de site)	-
		LT	Risques biotiques	Qualitative (par type de site)	-
		LT	Révolution	Durée de révolution	années
CMT/LT		Naturalité de l'espèce d'arbre	Diversifié en espèces d'arbres	Qualitative (par type de site)	-
				Indice de Shannon-Weaver	-
CMT		Diversité structurelle	Indice de structure verticale (rapport entre les 15% d'arbres les plus larges et les 15% d'arbres les plus petits)	-	
Maintien de la productivité du site		CMT/LT	Décomposition de la litière	Ratio C/N de la litière	-
	CMT/LT	Système racinaire	Qualitative	-	
	CMT	Perte de nutriments	1 = coupe à blanc 2 = sans coupe à blanc	0,1	

e. Calculer l'utilité attendue pour chaque stratégie selon les préférences de gestion

Pour chacune des stratégies de gestion, des fonctions dites «de préférence» ont été construites à partir des données scientifiques ou des dires d'experts. Elles prennent des valeurs entre 0 et 1 selon la valeur de chaque indicateur considéré. Par exemple, la **figure 8** illustre la fonction de préférence de la hauteur dominante par rapport au risque face au vent. Ces fonctions de préférence sont sommées et pondérées suivant le niveau hiérarchique des critères pour construire des fonctions d'utilité pour chaque objectif de gestion. Les trois fonctions d'utilité sont ensuite sommées selon les préférences de gestion de l'utilisateur.

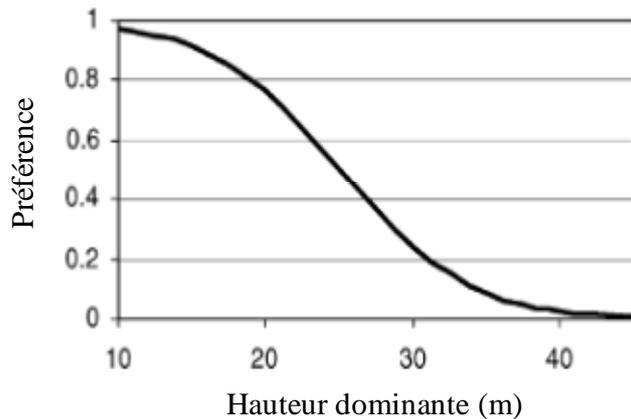


Figure 8. Fonction de préférence de la hauteur dominante par rapport au risque face au vent (d'après Lexer *et al.*, 2005).

f. Visualiser la stratégie la plus adaptée

Cette visualisation peut se faire sous la forme d'un histogramme qui donne la valeur des fonctions d'utilité pour chaque stratégie suivant chaque objectif (p. ex. **Fig. 9**). Le rang des stratégies est également établi et consultable.

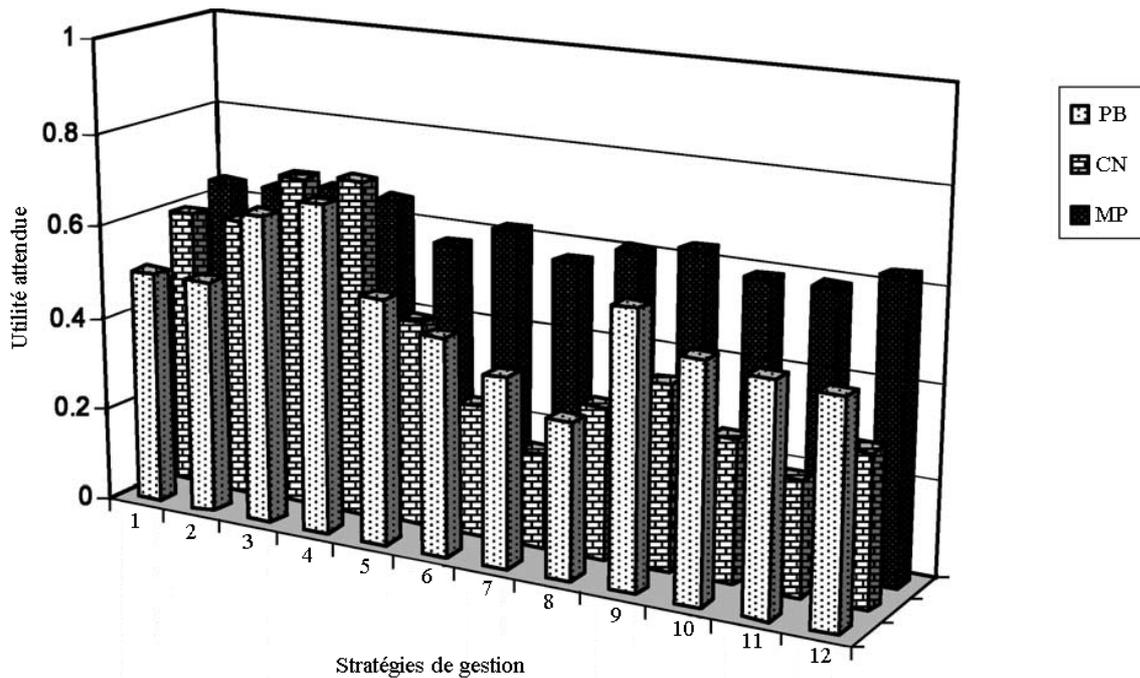


Figure 9. Valeurs des fonctions d'utilité attendues pour chaque stratégie de gestion (de 1 à 12) en considérant chaque objectif de gestion : production de bois, conservation de la nature et maintien de la productivité. PB : plus haute priorité pour la production de bois, CN : plus haute priorité pour la conservation de la nature et MP : plus haute priorité pour le maintien de la productivité du site (d'après Lexer *et al.*, 2005).

2.2. Points forts

- Tout comme AFFOREST cet outil propose une gestion multifonctionnelle de la forêt selon trois objectifs encore plus divers : production de bois, conservation de la nature et de la biodiversité et maintien ou amélioration de la productivité du site.
- Le **changement climatique** et les autres **incertitudes et risques**, pas seulement écologiques, sont intégrés dans cet outil. L'utilisation de deux échelles temporelles (court terme, 30 ans) et long terme (100 ans) et d'indicateurs adaptés à ces échelles renforce la prise en compte de ces incertitudes.
- La structure de l'outil permet de proposer aux gestionnaires à la fois **des essences futures** en peuplement purs ou mixtes mais aussi **des traitements sylvicoles**. Elle les accompagne donc dans les différents aspects d'un itinéraire sylvicole adapté aux scénarios futurs.

2.3. Limites

- L'outil est construit à une échelle spatiale locale fortement dépendante des conditions stationnelles qui ont été décrites. De plus, le choix des caractéristiques de la parcelle est **peu modulable** puisqu'elles sont prédéfinies. Pour adapter l'outil à d'autres sites, il est ainsi nécessaire d'implémenter les caractéristiques des autres stations dans le logiciel avant de l'utiliser.

- Seulement deux **scénarios climatiques futurs assez simples** sont envisagés (augmentation de la température annuelle de 2°C avec ou sans diminution des précipitations annuelles de 15 % à l’horizon 2050) et ils influencent uniquement le choix des essences futurs.

- L’autécologie est intégrée *via* un modèle physiologique avec seulement trois facteurs (un climatique et deux édaphiques) qui influencent l’acclimatation de chaque espèce. Peu de précision sont données sur la description de l’autécologie des essences en peuplements mixtes : s’agit-il de l’assemblage de l’autécologie de chaque espèce ou de données écologiques récoltées sur les peuplements ?

- Parmi les ressources qui alimentent l’outil, la part de littérature scientifique et de dires d’experts n’est pas explicitement indiquée. Les deux semblent avoir le même poids dans la décision alors que la validation scientifique est une étape importante pour vérifier les informations.

3. Ecological Site Classification (ESC)

3.1. Description

Au Royaume-Uni, le logiciel « Ecological Site Classification » (ESC) a été créé par Duncan Ray et ses collaborateurs qui y travaillent depuis 1992 à la Forestry Commission. L’objectif de cet outil est d’aider les gestionnaires dans leur choix d’essences futures dans le contexte du changement climatique. Pour cela, il calcule la productivité relative de chaque espèce (16 feuillus et 12 conifères) pour la période de référence (1961-1990) mais également pour les périodes futures (2036-2065 et 2066-2095). Sa structure est composée d’une interface utilisateur et d’une plateforme SIG. Contrairement aux deux outils précédents, il n’utilise pas d’analyse de décision multicritère mais les utilisateurs peuvent prendre leurs décisions à partir des résultats affichés. Son fonctionnement général est présenté dans la **figure 10**.

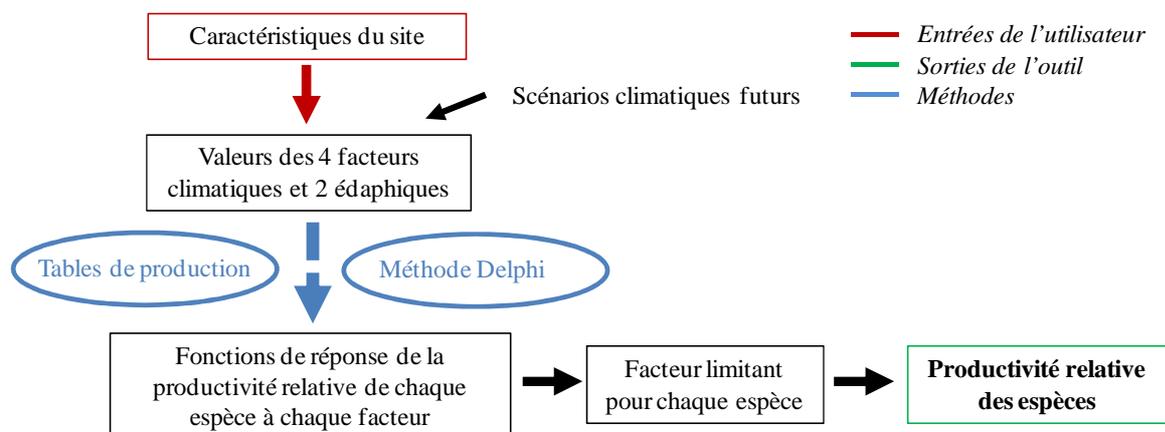


Figure 10. Schéma général du fonctionnement de l’outil ESC.

Les utilisateurs entrent leurs données propres au site : position du site, altitude et type de sol (racines, cailloux, texture) et éventuellement le profil du sol et les relevés floristiques. La

position et l'altitude permettent de définir quatre facteurs climatiques à une résolution spatiale de 1 ha :

- la température cumulée qui est la somme des degrés-jour supérieurs à 5°C durant la saison de croissance ;
- le déficit hydrique qui est le maximum mensuel de la différence entre l'évapotranspiration potentielle de Penman (1948) et les précipitations durant les mois d'été de la période considérée ;
- un indice d'exposition au vent (Quine et White, 1993) ;
- l'indice de continentalité de Conrad qui dépend de l'amplitude thermique annuelle et de la latitude.

Les variables d'entrée « sol » permettent de définir deux facteurs édaphiques selon des notes sans unité : l'alimentation hydrique et la fertilité minérale.

Pour chaque essence, les **fonctions de réponse de la production relative** (productivité observée/productivité maximale estimée selon Edwards et Christie, 1981) à chaque facteur ont été établies après interrogation de six experts selon la **méthode Delphi**. La méthode Delphi a pour but de mettre en évidence des convergences d'opinion et de dégager certains consensus sur des sujets précis, grâce à l'interrogation d'experts, à l'aide de questionnaires successifs. Pour quelques espèces, ces fonctions de réponse ont ensuite été confrontées à des données empiriques et les résultats sont assez proches (Ray D., communication personnelle). La productivité relative de chaque essence est ensuite renseignée pour chacun des six facteurs. Des seuils d'acclimatation sont définis pour chaque facteur :

- « non acclimaté » lorsque la productivité relative est inférieure à 0,50
- « acclimaté » lorsque la productivité relative est comprise entre 0,50 et 0,75 ;
- « très acclimaté » lorsque la productivité relative est supérieure à 0,75.

Selon ces seuils, le ou les facteurs limitants sont déterminés pour chaque essence. La productivité relative de l'essence est alors déterminée selon la température cumulée puis corrigée par le déficit de productivité du au facteur limitant. La carte d'acclimatation de l'essence pour la période 1961-1990 est ainsi obtenue.

La même méthode est utilisée pour prédire l'acclimatation future des essences sur chaque site. Seuls deux facteurs climatiques sont modifiés : la température cumulée et le déficit hydrique selon le scénario climatique « [UKCIP02](#) » (United Kingdom Climate Impacts Programme 02) développé par le Hadley Centre et les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre de l'IPCC (IPCC, 2007). Les cartes d'acclimatation de l'essence sont ainsi obtenues pour les périodes futures (2036-2065 et 2066-2095). Le gestionnaire obtient donc des cartes de changement d'acclimatation pour chaque site et chaque essence (p. ex. **Fig. 11**, *Pseudotsuga menziesii* en Ecosse).

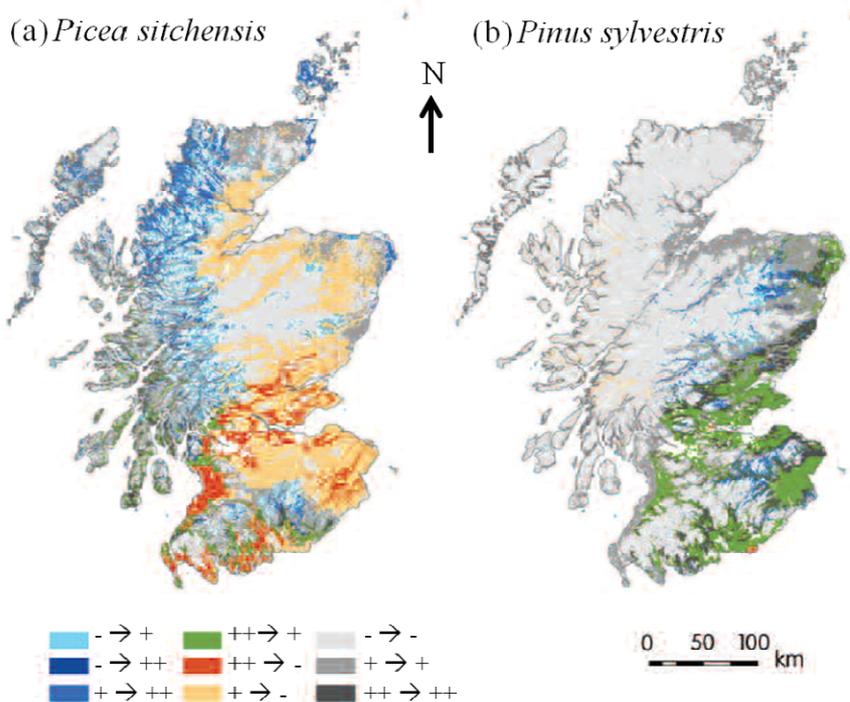


Figure 11. Cartes de changement d'acclimation de *Picea sitchensis* (a) et *Pinus sylvestris* (b) en Ecosse de 1961-1990 à 2066-2095 selon le scénario climatique UKCIP02 et un scénario élevé d'émissions de gaz à effet de serre (A1FI). - : productivité relative inférieure à 0,50 ; + : productivité relative comprise entre 0,50 et 0,75 et ++ : productivité relative supérieure à 0,75 (d'après Ray, 2008).

Depuis 2008, l'ESC est utilisé dans le cadre du projet [CLIMADAPT](#), financé par le gouvernement irlandais à travers COFORD qui est le programme de recherche forestière compétitive pour le développement. Ce projet a permis la création d'un [outil web](#) à destination des gestionnaires forestiers. Il a permis des développements de l'ESC (Ray *et al.*, 2009) :

- une carte des risques de gelées tardives (obtenues à partir de 5 facteurs topographiques). Cette carte est utilisée comme outil de décision supplémentaire pour les gestionnaires mais n'est pas directement intégrée dans l'ESC.
- la prise en compte de la couverture végétale pour améliorer les valeurs des 2 facteurs édaphiques (alimentation hydrique et fertilité minérale) pour chaque site.

3.2. Points forts

- L'ESC est relativement simple à appréhender et facile d'utilisation pour les gestionnaires. La résolution spatiale assez fine pour convenir aux gestionnaires locaux et les sorties sont réalisées sur l'ensemble du territoire.
- Le nombre de facteurs abiotiques est restreint (6), en adéquation avec la géographie du pays, puisque les indices de vent et de continentalité sont importants à prendre en considération dans le cas d'une île. L'action des **facteurs limitants**, primordiale pour prédire la réponse des essences, est pleinement intégrée dans l'outil.

- La réponse étudiée est la productivité en m³/ha (volume/surface) qui est une préoccupation majeure pour les forestiers dans un objectif de production de bois.
- Le **changement climatique** est explicitement intégré et les scénarios climatiques futurs de l'IPCC sont pris en compte en changeant deux facteurs essentiels : la température et le déficit hydrique.

3.3. Limites

- L'ESC ne considère **pas des objectifs multifonctionnels** de gestion mais seulement un objectif de production. Les gestionnaires n'indiquent donc pas leurs préférences de gestion et il n'y a pas d'analyses multicritères pouvant les guider dans leur choix.
- Les fonctions de réponse sont obtenues à partir de dires d'un nombre restreint d'experts (6 au Royaume-Uni et 5 en Irlande), ce qui permet une collecte rapide des informations. Mais, ces fonctions semblent **peu validées scientifiquement** et comportent probablement un nombre important d'incertitudes non quantifiables et des risques considérables pour la prédiction de l'évolution des écosystèmes futurs.
- Les facteurs du peuplement tels que leur âge, leur provenance ou leur structure sylvicole ne sont pas pris en compte, pas plus que la réponse des essences en peuplements mélangés.
- Les tables de production qui sont utilisées comme unique référence scientifique quantitative datent de 1981 et il semble nécessaire de les actualiser ou de les compléter par d'autres sources.

4. ForestGALES

4.1. Description

Le logiciel d'aide à la décision ForestGALES a été développé par des chercheurs de la Forestry Commission au Royaume-Uni (Gardiner *et al.*, 2006). La première version a été créée en 2000. Il a d'abord été utilisé en Ecosse puis en Nouvelle-Zélande, en France (Sud-Ouest), au Canada (Est) et au Japon. Son objectif est d'**estimer les probabilités de dégâts du vent sur les parcelles de conifères**. Il est destiné à un public large issu de la recherche, de l'enseignement ou de la gestion forestière publique ou privée. Il fonctionne à plusieurs échelles spatiales de la parcelle au paysage avec une résolution minimum de 10 ha. Sa structure est composée d'un modèle mécaniste et d'une interface utilisateur. Tout comme l'ESC, également développée par la Forestry commission, il n'utilise pas d'analyse de décision multicritère mais les utilisateurs peuvent prendre leurs décisions à partir des résultats affichés. Son schéma général est présenté dans la **figure 12**.

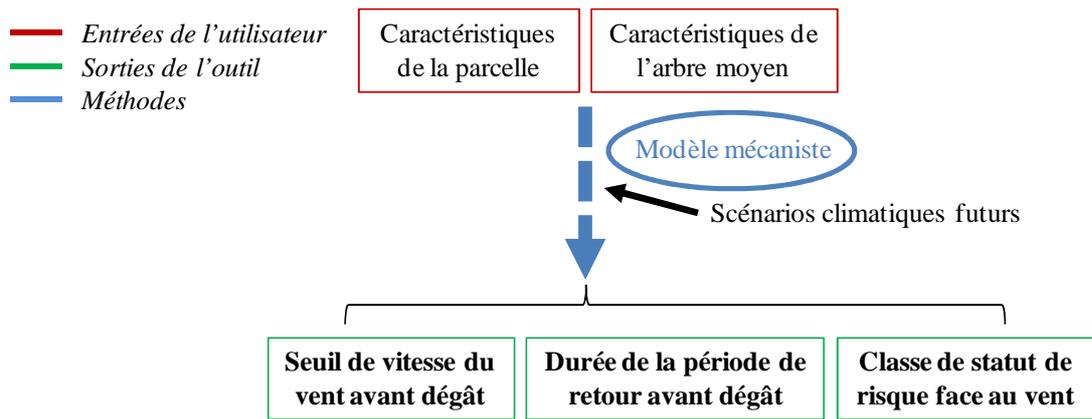


Figure 12. Schéma général du fonctionnement de l'outil ForestGALES

Il fonctionne grâce à des **équations mécanistes** qui permettent de déterminer :

- la force nécessaire pour causer les volis ou les chablis ;
- la vitesse de vent qui peut engendrer la force requise pour provoquer des dommages sur les arbres ;
- la probabilité pour que le seuil de vitesse critique du vent soit atteint.

Les utilisateurs ont trois choix possibles pour indiquer les caractéristiques de la parcelle et de l'arbre moyen, qui sont les paramètres d'entrée nécessaires au modèle :

- **les prédictions selon les mesures de terrain.** L'utilisateur doit ici fournir les caractéristiques de la parcelle : le type de plantation, le taux de drainage (faible, moyen, fort), le type de sol (drainant, tourbe, gleys ou autres), la densité initiale ou l'espacement entre arbres et l'indice d'exposition au vent (Quine et White, 1993), et les caractéristiques de l'arbre moyen : l'espèce, la hauteur dominante et le diamètre moyen à 1,30 m ;

- **les prédictions selon les modèles de rendement.** L'utilisateur entre les caractéristiques de la parcelle comme précédemment : le type de plantation, le taux de drainage et le type de sol avec en option l'année de plantation des arbres et pour les caractéristiques de l'arbre moyen : la classe de rendement d'après Edwards & Christie (1981), le régime d'éclaircie, l'espacement initial des arbres et l'âge moyen. Ces derniers paramètres permettent au modèle de rendement de déterminer : la hauteur dominante, la densité du peuplement, le diamètre moyen à 1,30 m, la surface terrière du peuplement, le volume moyen par arbre et le volume de bois par hectare ;

- **les prédictions au cours du temps.** Elles permettent à l'utilisateur d'obtenir les risques de dégâts dus au vent sur l'ensemble ou une partie de la révolution plutôt qu'à un seul âge comme précédemment. Les caractéristiques de la parcelle et de l'arbre moyen à renseigner sont identiques à celles des prédictions selon les modèles de rendement, excepté l'âge du peuplement qui n'est pas demandé.

A partir de ces caractéristiques, le modèle mécaniste permet de simuler différentes sorties en prenant en compte l'évolution dendrométrique du peuplement au cours du temps et les scénarios futurs de vent. Ces sorties sont : la vitesse seuil du vent avant dégâts sur les tiges, la

durée de la période de retour avant dégâts dus au vent (p. ex. **Fig. 13**) et le statut de risque du peuplement face au vent allant de 1 à 6. Les fonctions de réponses de la vitesse seuil du vent selon les caractéristiques des arbres ont été obtenues à partir de régressions statistiques réalisées sur 2000 échantillons pour déterminer la résistance au déracinement. Pour cela, différentes essences de conifères ont été tirées par des treuils au niveau du tronc et la résistance au déracinement a été mesurée (Gardiner *et al.*, 2000).

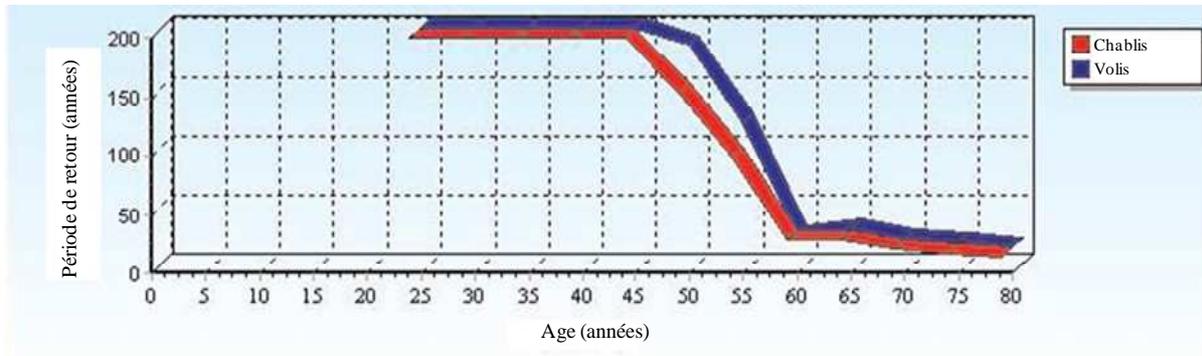


Figure 13. Durée de la période de retour avant une tempête engendrant des dégâts forestiers en fonction de l'âge de révolution. Exemple de sortie obtenue avec l'outil ForestGALES selon une prédiction au cours du temps. Généralement, plus les arbres sont vieux et hauts, plus le risque de dégâts dus au vent augmente et la période de retour diminue (d'après Gardiner *et al.*, 2006).

4.2. Points forts

- Cet outil est construit à partir d'un **modèle mécaniste** simulant les processus de résistance des arbres face au vent selon leur architecture. L'interface demeure néanmoins simple pour l'utilisateur avec la possibilité de choisir une paramétrisation adaptée aux informations dont il dispose.
- ForestGALES est décrit comme un **outil probabiliste**, c'est-à-dire que la notion de risque face aux dégâts du vent est au cœur de sa structure. Face à ce risque, les gestionnaires doivent décider leur mode de gestion.
- Ce logiciel s'appuie sur **30 années de recherche** dans le domaine et reprend les grands indices étudiés précédemment pour faire le lien avec les travaux passés. Les fonctions de réponse de la vitesse seuil de vent avant dégâts en fonction des caractéristiques des arbres ont été établies à partir d'un grand nombre d'échantillons (2000) sur des sites et des espèces différents.
- La dynamique temporelle est prise en compte *via* l'intégration des scénarios futurs de la circulation du vent et l'évolution dendrométrique du peuplement au cours du temps. Plusieurs échelles spatiales sont présentes dans l'outil : de la parcelle au paysage.

4.3. Limites

- Le modèle utilisé est paramétré sur des caractéristiques dendrométriques du peuplement et donc très dépendant de ces informations.
- Il ne prend pas en compte le changement climatique et différents scénarios de fréquence et d'intensité de tempêtes.
- L'outil ne contient **pas d'analyse multicritère** pouvant guider les gestionnaires vers des stratégies adaptées de gestion face au vent, autre que l'éclaircie. Par exemple, il n'y a pas possibilité de comparer directement l'effet espèce sur la résistance au vent du peuplement.
- A l'échelle spatiale du paysage, le logiciel fonctionne lentement du fait d'une résolution de 10 ha.

5. Tree Atlas

5.1. Description

L'outil « Tree Atlas Climate Change » n'est pas répertorié comme un système d'aide à la décision dans le wiki FORSYS. Cependant, il s'agit d'un atlas en libre accès sur internet qui intègre l'autécologie des essences forestières et permet de prédire et visualiser l'habitat potentiel futur de celles-ci. Il nous semblait ainsi pertinent de décrire cette approche, légèrement différente des précédentes, mais qui fait appel à des connaissances proches sur l'autécologie des espèces. Le Tree Atlas a été développé par des chercheurs de la Northern Research Station qui fait partie du Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis (USDA), plus particulièrement par Iverson L.R. et Prasad A.M. Son objectif est de **prédire les habitats potentiels futurs de 134 essences forestières présentes aux Etats-Unis** (Iverson *et al.*, 2008). Il a été créé en 1999, à partir du modèle statistique empirique DISTRIB (Iverson et Prasad, 1998). Il comporte une interface utilisateur permettant de sélectionner les différentes simulations à visualiser, sous forme de cartographie ou de tableaux de résultats. Il ne comprend pas d'analyse de décision multicritère bien qu'il soit en partie à destination des gestionnaires forestiers. Il fonctionne à l'échelle du paysage avec une résolution spatiale de 400 km². Son schéma général est décrit dans la **figure 14**.

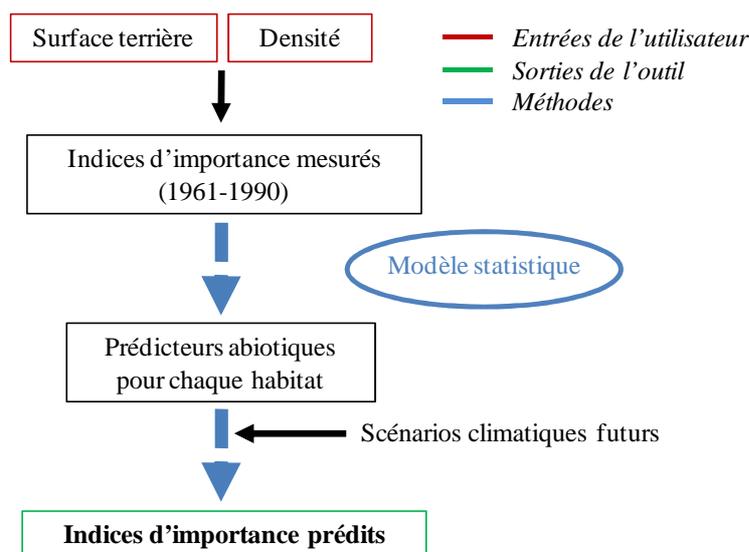


Figure 14. Schéma général du fonctionnement de l'outil Tree Atlas.

Nous allons décrire brièvement les différentes étapes du modèle. Tout d'abord, les **indices d'importance** (IV) sont calculés sur la période de référence (1961-1990) à partir d'inventaires réalisés sur 100 000 sites tels que :

$$IV = \frac{100 * g(esp.)}{G} + \frac{100 * n(esp.)}{N}$$

où g est la surface terrière de l'espèce, G est la surface terrière du peuplement, n est le nombre d'individus de l'espèce et N est le nombre d'individus dans le peuplement.

Ensuite, le modèle DISTRIB simule les **prédicteurs abiotiques pour chaque habitat** via différentes méthodes statistiques dont l'arbre de régression. Il permet de quantifier l'influence de chaque facteur abiotique sur la valeur mesurée de l'indice d'importance et de donner leurs valeurs seuils. Ces prédicteurs sont sélectionnés pas à pas à partir d'un jeu de **38 facteurs** climatiques, topographiques et édaphiques. Les valeurs des indices d'importance calculées à partir de ces prédicteurs pour la période de référence sont comparées aux valeurs mesurées pour valider le modèle.

Dans une dernière étape, les indices d'importance pour la période 2071-2100 par essence et par site sont estimés à partir des prédicteurs intégrant les scénarios futurs de climat (modèles de circulation générale : HADCM3, PCM et GFDL) et d'émissions de gaz à effet de serre (A1FI, B1 ; IPCC, 2007). Les données intermédiaires telles les valeurs des prédicteurs ou les arbres de régression sont accessibles aux utilisateurs. Les indices d'abondance sont visualisables sous forme de carte où l'utilisateur peut choisir son scénario type de modèle de circulation générale et le scénario d'émissions futur (p. ex. **Fig. 15**). Un indicateur de fiabilité de prédiction est également mentionné pour chaque espèce selon la quantité de données disponibles sur cette espèce dans l'inventaire.

Récemment, d'autres facteurs ont été considérés, à savoir des facteurs biotiques (tolérance à l'ombre, dispersion et capacité de régénération), des facteurs de perturbation (pathogènes,

événements climatiques extrêmes et pollution), les incertitudes dues aux scénarios climatiques et d'émissions et la limite de déplacement maximal de l'espèce sur 100 ans (Matthews *et al.*, 2011).

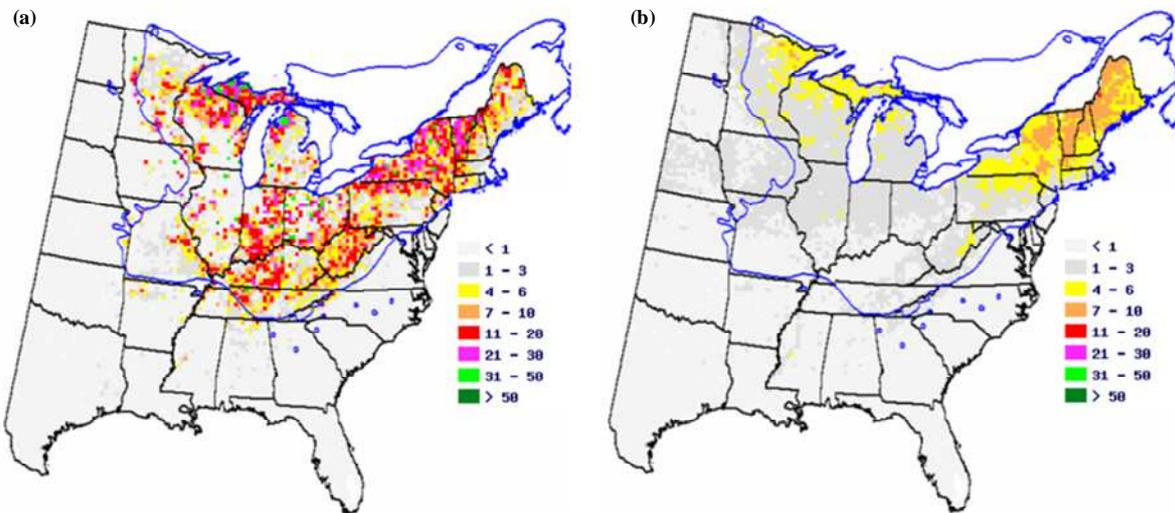


Figure 15. Indices d'importance issus de l'outil Tree Atlas pour *Acer Saccharum*, mesurés pour la période 1961-1990 (a) et prédits pour la période 2071-2100 d'après le modèle GFDL et le scénario A1FI d'émissions de gaz à effet de serre (b, source <http://www.nrs.fs.fed.us/atlas/tree>).

5.2. Points forts

- Le Tree Atlas a été développé à partir d'un **modèle statistique puissant** intégrant différentes méthodes statistiques pour définir les facteurs influençant les habitats. Le nombre de facteurs considéré dans ce modèle est important et ils sont très divers, notamment avec l'intégration récente des facteurs biotiques et de perturbation.
- Par rapport aux autres outils précédents, davantage de **scénarios futurs** peuvent être sélectionnés, aussi bien concernant le climat que les émissions de gaz à effet de serre. L'impact de l'**incertitude** de ces scénarios sur la réponse des espèces est également une démarche primordiale pour les prédictions des habitats potentiels. La **fiabilité** des prédictions est par ailleurs indiquée pour chaque espèce se qui permet de prévenir les utilisateurs des incertitudes sur les données présentées.
- L'atlas est accessible en ligne avec la possibilité pour l'utilisateur de visualiser plusieurs résultats intermédiaires, comme les arbres de régression, en plus des cartes finales.

5.3. Limites

- L'outil est construit à partir des mesures d'inventaire pour la période de référence (1961-1990). Par conséquent, les relations entre facteurs et réponses des espèces sont fixées à cette période. Ces relations ne peuvent pas évoluer en l'absence d'inventaires plus récents

contrairement à celles qui régissent les modèles mécanistes par exemple. Les prédictions dépendent donc très fortement des inventaires réalisés.

- Les prédicteurs qui sont utilisés sont des résultats statistiques. Dans cet outil, le **fondement écologique** des relations facteur/réponse pour définir un habitat ne semble pas vérifié par des mesures expérimentales ce qui peut poser problème pour envisager les adaptations futures des essences.

- Le Tree Atlas paraît **peu adapté aux gestionnaires** de par sa grande échelle spatiale et son manque de paramétrisation à l'échelle locale. Contrairement à d'autres outils, il est difficile d'identifier le type d'utilisateurs ciblés par cette démarche.

6. Tableau de synthèse des outils présentés

Dans le **tableau 3** ci-dessous, nous avons récapitulé les principales caractéristiques des outils d'aide à la décision présentés.

Tableau 3. Principales caractéristiques des outils d'aide à la décision intégrant l'autécologie des essences forestières, présentés dans la synthèse.

Outils	AFFOREST	DSD	ESC	ForestGALES	Tree Atlas
Date de création	2004	2001	2001	2000	1999
Pays	Suède, Danemark, Pays-Bas, Belgique	Autriche	Royaume-Uni	Royaume-Uni	Etats-Unis
Thématique	Boisement de terres agricoles	Choix de peuplements et sylviculture adaptés	Choix des espèces adaptées	Probabilités de dégâts du vent	Distribution des espèces
Objectif de gestion	Multifonctionnel	Multifonctionnel	Production	Stabilité du peuplement	Production
Echelle spatiale	Parcelle-région (1 ha ou 1 km ²)	Parcelle	Parcelle-paysage (1 ha)	Parcelle-paysage (10 ha)	Paysage (400 km ²)
Echelle temporelle	0-30 ans	0-100 ans	Selon les scénarios climatiques	0-80 ans	Selon les scénarios climatiques
Analyse multicritère	Oui	Oui	Non	Non	Non
Type de modèle	Métamodèle mécaniste	Modèle d'autécologie, modèle de croissance	Tables de production	Modèle mécaniste	Modèle statistique
Utilisateurs ciblés	Décideurs politiques, gestionnaires	Gestionnaires	Gestionnaires, décideurs politiques	Gestionnaires	Gestionnaires, décideurs, chercheurs
Paramétrisation	Forte	Faible	Moyen	Faible-moyen	Forte
Facteurs	Climatiques, édaphiques, utilisation des terres	Climatiques	Climatiques et édaphiques	Vent	Climatiques, édaphique, utilisation des terres et biotiques
Réponses	Séquestration de carbone, lessivage des nitrates, recharge en eau du sol	Indicateurs dendrométriques, édaphiques et de biodiversité	Productivité relative	Vitesse de vent critique, période de retour avant dégâts, statut de risque face au vent	Indice d'importance (surface terrière et densité)
Changement climatique	Non	Oui	Oui	Non	Oui
Aide au choix des essences	Oui, 4 essences	Oui	Oui	Oui (conifères)	Oui

III. Cahier des charges pour un outil d'aide à la décision dans le contexte du changement climatique

A partir de l'analyse du fonctionnement, des points forts et des limites de chaque outil que nous avons analysé, un cahier des charges a été établi pour élaborer un outil d'aide à la décision dans le contexte des changements globaux (composantes climat et émissions de CO₂) en France.

1. Utilisateurs ciblés et aide à la décision

Les utilisateurs ciblés seraient les gestionnaires de parcelles forestières privées et publiques, en intégrant dans la réflexion l'ensemble des niveaux de gestion, depuis les orientations nationales, jusqu'aux choix d'aménagement à l'échelle du massif forestier. L'outil doit les aider à adapter les choix d'essences à l'évolution des conditions écologiques, notamment au changement climatique et à l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Il proposera en priorité une aide dans le choix des essences, préoccupation majeure des gestionnaires. Il pourra également proposer des solutions de gestion adaptative en ce qui concerne les traitements sylvicoles associés (rythmes et taux d'éclaircies, longueur de révolution, densité des peuplements) et la diversité interspécifique (peuplement mélangé ou monospécifique). Les mélanges peuvent être une mosaïque de peuplements monospécifiques de différentes essences à l'échelle du paysage ou des mélanges d'essences pied à pied sur la même parcelle. A plus long terme, selon les connaissances autécologiques, une aide sur le choix des provenances pourrait être envisagée (diversité intra-spécifique).

2. Objectifs

L'objectif principal serait de transférer les connaissances scientifiques sur l'autécologie des essences forestières dans un outil opérationnel pour les gestionnaires à différentes échelles spatiales. La construction de cet outil soulève différentes questions scientifiques :

- Comment les essences forestières répondent-elles aux interactions entre changement climatique et augmentation du CO₂ atmosphérique ?
- Quelles sont les essences forestières potentiellement adaptées dans une aire spatiale donnée et à des horizons de temps à moyen et long termes ?
- Quelles sont les stratégies les plus adaptées en termes de composition, richesse spécifique et traitement sylvicole associé ?
- Quel est l'impact de ces stratégies adaptatives sur la biodiversité et les services écosystémiques ?

En outre, cet outil permettrait (i) de rénover l'approche autécologique (relations station-production, catalogues et guides forestiers, fiches autécologiques en intégrant des paramètres quantitatifs évoluant avec les facteurs abiotiques, comme la durée de la saison de végétation par exemple) ; (ii) d'étendre l'approche autécologique à une approche d'écologie intégrative

prenant en compte des facteurs biotiques (rythmes d'éclaircies, densité du peuplement et période de révolution) ainsi que la richesse spécifique (nombre d'essences forestières et assemblage) ; et (iii) de développer une gestion forestière adaptée aux changements globaux et aux préoccupations futures en considérant l'ensemble des incertitudes et les effets des stratégies adaptatives sur la biodiversité, les services écosystémiques et les risques économiques.

3. Construction de l'outil

De façon générale, cet outil doit être modulable et prévoir de nombreuses possibilités d'évolution. Autrement dit, sa structure ne doit pas être restrictive dès sa création car elle sera amenée à évoluer en fonction des résultats acquis en recherche et des nouveaux besoins de gestion.

3.1. Echelle spatio-temporelle

Le choix des échelles spatiales et de leur harmonisation sont une problématique centrale pour la construction de l'outil. Ces échelles seront à la fois dépendantes des attentes des utilisateurs ciblés et des modèles d'impact qui pourront être développés au sein de l'outil. Elles devront être multiples pour assurer une mise en œuvre aux différentes échelles de décision et d'aménagement du territoire. Il semble cependant nécessaire de développer en priorité une résolution spatiale locale, à l'échelle de la parcelle ou du massif forestier pour assurer l'opérationnalité de l'outil auprès des gestionnaires privés notamment. Les échelles régionale et nationale, sur lesquelles les modèles d'impact sont le mieux validés actuellement, seraient également envisagées. Les horizons de temps envisagés seront à moyen (30-50 ans) et long termes (100-150 ans) pour proposer des stratégies adaptatives de l'ordre des durées de révolutions des peuplements (30 à 150 ans). Il devra être possible pour l'utilisateur de moduler cet horizon de temps afin d'adapter les sorties de l'outil aux besoins de gestion.

3.2. Fonctionnement

Le fonctionnement général pourra s'inspirer en grande partie de celui de l'outil DSD développé en Autriche à l'échelle locale. Cet outil a en effet beaucoup de points forts (détaillés dans la synthèse) et s'inscrit dans des objectifs de gestion multifonctionnelle. Le fonctionnement général que nous proposons est présenté dans la **figure 16** ci-dessous.

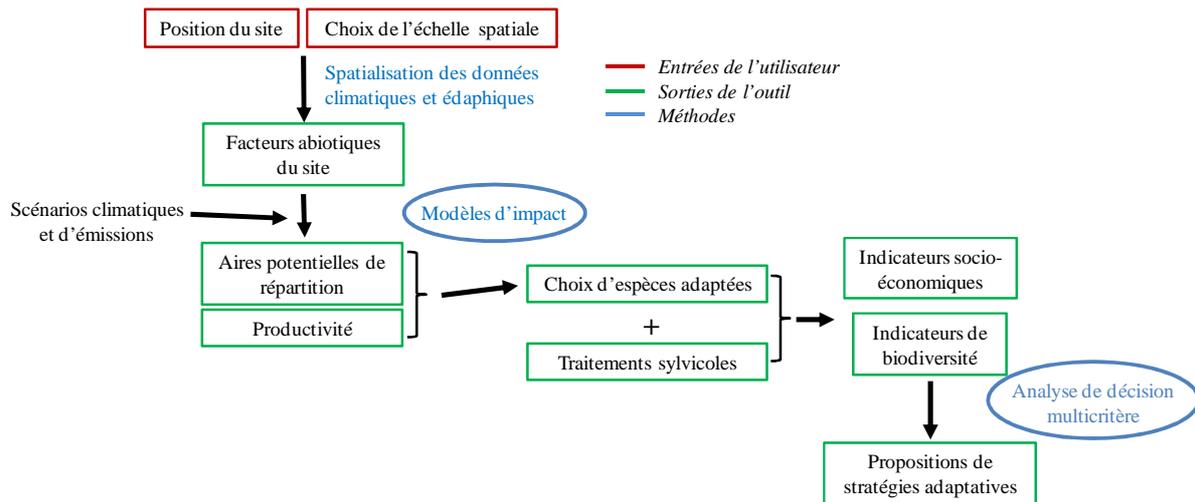


Figure 16. Préfiguration du fonctionnement d'un outil d'aide à la décision en France.

3.3. Structure modulaire

L'outil devra être le plus accessible possible pour les utilisateurs. Un accès *via* internet semble ainsi le plus adéquat. Il pourra être sous la forme d'un logiciel téléchargeable ou d'une plateforme internet. Dans tous les cas, il faut réfléchir au meilleur support technique pour lui permettre de fonctionner rapidement. Les mises à jour seraient centralisées et réalisées par les développeurs de l'outil uniquement. L'outil comprendrait une structure modulaire constituée :

- d'un module géomatique, qui permettrait de référencer spatialement les paramètres initiaux des sites, de créer plusieurs couches de facteurs (climat, sol...) et de visualiser les sorties sous forme de cartes aux échelles où l'information est pertinente ;
- des modèles écologiques d'impact (modèles de niche, modèles de croissance, modèles mécanistes) qui seraient inter-comparés. Ces modèles seraient choisis parmi les existants en fonction de leur opérationnalité, de leur complémentarité en termes de changements pris en compte (climat, CO₂), de variables de sortie (distribution, productivité) et des essences dont les performances sont simulées ;
- un module d'analyse de décision multicritère. A partir du calcul d'indicateurs socio-économiques et de biodiversité, ce module évaluerait les différentes stratégies adaptatives possibles d'après les sorties des modèles d'impact. Cette évaluation serait fondée sur la performance des stratégies adaptatives en matière de services écosystémiques, comme par exemple la production de bois, la séquestration du carbone ou la conservation de la biodiversité ;
- une interface utilisateur : même si les méthodologies constituant l'outil sont complexes, une interface simple doit être recherchée pour faciliter son utilisation. Des documents seraient proposés en support pour expliquer comment utiliser l'outil et également pour détailler les méthodologies employées.

Conclusion et perspectives

L'autécologie au sens strict est la science des réponses biologiques de chaque espèce aux facteurs abiotiques et ne traite pas des interactions biotiques et des autres niveaux d'organisation du vivant. Il s'agit donc d'une première étape pour identifier les essences forestières potentiellement adaptées au climat futur. Elle doit cependant être complétée par une approche prenant en compte les multiples interactions à l'échelle des communautés qui peuvent avoir des conséquences importantes sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Afin de rassembler les données autécologiques nécessaires à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision, il est primordial d'identifier les facteurs abiotiques quantifiables qui vont principalement influencer les réponses biologiques des espèces. Concernant le climat, les précipitations et les températures sont les facteurs les plus décrits. Le vent, et en particulier la fréquence et l'intensité des tempêtes, peuvent influencer la résilience des écosystèmes. L'ETP est également un facteur bioclimatique important à considérer car elle permet de calculer la demande atmosphérique en eau qui influence le fonctionnement des essences forestières. Pour le sol, l'alimentation hydrique et la fertilité minérale semblent être les facteurs les plus classiquement décrits pour l'autécologie des essences. Généralement, c'est la tendance moyenne de ces facteurs qui est principalement renseignée alors que les événements extrêmes ont également un impact important sur la réponse biologique des essences. L'identification des facteurs limitants et des seuils de rupture dans la réponse biologiques des essences forestières permettent de mieux prédire leur adaptation potentielle au changement climatique. La spatialisation des facteurs abiotiques à des échelles spatiales fines (parcelle, massif), correspondant aux échelles de gestion des propriétaires privés en particulier, est un enjeu majeur et demeure difficile à réaliser et à valider. Les réponses biologiques doivent être décrites sous la forme de fonction de réponse à un facteur abiotique. Pour y parvenir, de multiples approches sont nécessaires comme : l'étude des relations station-production, l'écophysiologie qui permet de décrire des mécanismes de fonctionnement des arbres, la dendrochronologie pour analyser rétrospectivement l'impact des facteurs environnementaux sur la croissance radiale, la mesure des traits fonctionnels qui sont reliés à la valeur sélective des individus, la télédétection pour obtenir des informations à des échelles spatiales larges et la génétique pour mieux déterminer les caractères héréditaires et la provenance des essences. Ces approches peuvent être complétées par des dires d'experts lorsque les informations sont limitées.

Cette synthèse met en évidence la nécessité de développer des outils informatiques d'aide à la décision pour permettre la rénovation de l'approche autécologique dans le contexte du changement climatique. Ce type d'outil, en pleine expansion dans d'autres pays, et intègre les connaissances sur l'autécologie des essences dans un outil opérationnel et accessible aux gestionnaires forestiers. L'analyse des outils existants à l'étranger, et intégrant l'autécologie des essences, nous a permis de faire un bilan sur les échelles spatio-temporelles, le degré de paramétrisation et la structure des modèles d'impact qui sont utilisés, les sources de données autécologiques, les scénarios climatiques pris en compte, et le nombre d'essences traitées. Parmi les cinq outils étudiés, deux retiennent particulièrement notre attention : l'ESC et DSD.

L'ESC est construit principalement à partir d'expertises collectives qui permettent d'établir rapidement des fonctions de réponse des essences et de les appliquer à l'échelle de la parcelle ou du paysage. DSD est construit à l'échelle locale, à partir de modèles de croissance et d'autécologie, et revêt une dimension multifonctionnelle de la gestion forestière en intégrant une analyse de décision multicritère notamment. Dans leur construction, ces outils sont très différents et reflètent l'hétérogénéité de ces outils d'aide à la décision qui dépend des objectifs d'utilisation définis en amont de leur construction.

L'analyse de ces outils disponibles à l'étranger a souligné la nécessité de préfigurer un outil en France, qui pourrait éventuellement être couplé à la plateforme de simulation de croissance Capsis. Cet outil se voudrait à destination des gestionnaires publics et privés et servirait de guide pour le choix des essences et le traitement sylvicole approprié (rythme des éclaircies, rythmes de révolutions, densité des arbres...). Les stratégies adaptatives de cet outil seraient pour des horizons de temps de l'ordre de 50 et 100 ou 150 ans. Il doit être sous forme de modules (géomatique, modèles d'impact, analyse de décision multicritère, interface utilisateur...) qui pourront ainsi être développés indépendamment. Dès sa préfiguration, l'outil doit être envisagé comme évolutif pour qu'il puisse être durable et intégrer les nouvelles connaissances scientifiques. Il est nécessaire de fédérer les approches à l'échelle nationale. Par exemple, différents modèles simulent la réponse des essences au climat mais selon leur construction (modèle mécaniste, modèle de croissance, modèle de niche...) ils n'apportent pas les mêmes conclusions quant à l'adaptation potentielle des essences. Leur comparaison et leur association au sein de l'outil permettra de mieux prendre en compte la variabilité de ces simulations et les incertitudes. Les échelles spatiales considérées seraient multiples (national, régionale et locale) avec une priorité de développement des modèles d'impact à l'échelle de la parcelle et du massif forestier qui sont majoritairement validés à de plus larges échelles actuellement. L'objectif de cet outil est également de développer d'une part la multifonctionnalité de la gestion forestière en estimant les conséquences des stratégies adaptatives sur les services écosystémiques et la biodiversité, et d'autre part de prendre en compte la gamme des incertitudes dans les solutions proposées aux gestionnaires.

Bibliographie

1. Abildtrup J., Garcia S. et Stenger A. (in press) The effect of forest land use on the cost of drinking water supply: A spatial econometric analysis. *Ecological Economics*.
2. Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., . . . Cobb N. (2010) A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management*, **259**, 660-684.
3. Bastien Y. et Gauberville C. (2011) Vocabulaire forestier - Écologie, gestion et conservation des espaces boisés, pp. 554 + annexes.
4. Becker M. (1972) Etude des liaisons Station-production dans une forêt sur sols hydromorphes (Forêt communale de Charmes, Vosges). *Revue Forestière Française*, **24**, 269-287.
5. Becker M. et Le Goff N. (1988) Diagnostic stationnel et potentiel de production. *Revue Forestière Française* **40**, 29-43.
6. Becker M., Le Tacon F. et Timbal J. (1980) Les Plateaux calcaires de Lorraine. Types de stations et potentialités forestières., pp. 268, Nancy.
7. Bellard C., Bertelsmeier C., Leadley P., Thuiller W. et Courchamp F. (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, **15**, 365-377.
8. Bertrand R., Lenoir J., Piedallu C., Riofrio-Dillon G., de Ruffray P., Vidal C., . . . Gegout J.-C. (2011) Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, **479**, 517-520.
9. Bréda N. et Badeau V. (2008) Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *Comptes Rendus Geoscience*, **340**, 651-662.
10. Bréda N., Huc R., Granier A. et Dreyer E. (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, **63**, 625-644.
11. Brisson N. et Levraut F., eds (2010) Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). ADEME.
12. Bugslag C.R. (1968) Ecology as a factor in planning for outdoor recreation, University of British Columbia, pp. 123.
13. Carnicer J., Coll M., Ninyerola M., Pons X., Sánchez G. et Peñuelas J. (2011) Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
14. Choat B., Jansen S., Brodribb T.J., Cochard H., Delzon S., Bhaskar R., . . . Zanne A.E. (2012) Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, **491**, 752-755.
15. Christensen J.H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., . . . Whetton P. (2007) Regional Climate Projections. Dans: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller), pp. 849-940. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

16. Ciais P., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V., . . . Valentini R. (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, **437**, 529-533.
17. Davis M.B. et Shaw R.G. (2001) Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change. *Science*, **292**, 673-679.
18. de l'Estoile M. (2012) La valorisation de la forêt française. Section de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation, pp. 96.
19. Delpech R., Dumé G. et Galmiche P. (1985) Typologie des stations forestières : vocabulaire, pp. 243.
20. Dittmar C., Zech W. et Elling W. (2003) Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendroecological study. *Forest ecology and management*, **173**, 63-78.
21. Edwards P.N. et Christie J.M. (1981) Yield models for forest management (vol. 48). HMSO, London.
22. Forêt M. et Dumé G. (2006) Les outils d'aide à la reconnaissance des stations forestières et au choix des essences - Méthodes et recommandations pratiques ou Guide-âne, pp. 224. IFN.
23. Frontier S. et Pichod-Viale D. (1993) Ecosystème : structure - fonctionnement - évolution, pp. 447.
24. Garbaye J., Leroy P., Le Tacon F. et Levy G. (1970) Réflexions sur une méthode d'études des relations entre facteurs écologiques et caractéristiques des peuplements. *Annals of Forest Science*, **27**, 303-321.
25. Gardiner B., Peltola H. et Kellomäki S. (2000) Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecological Modelling*, **129**, 1-23.
26. Gardiner B., Suárez J., Achim A., Hale S. et Nicoll B. (2006) ForestGALES. A PC-based wind risk model for British Forests. User's Guide. Version 2.1, pp. 54. Forestry Commission.
27. Gaudin S. (1997) Quelques éléments d'écologie utiles au forestier. BTSA Gestion Forestière, pp. 88.
28. Gégout J.-C. (2008) Validation des bio-indicateurs floristiques pour une surveillance de l'état nutritionnel des sols forestiers français à partir des données de l'Inventaire forestier national - Rapport final, Programme bioindicateur qualité des sols Convention ADEME/IFN/ENGREF n° 0562C0029, pp. 48 + annexes.
29. Gilliams S., Van Orshoven J., Hansen K., Skov-Petersen H. et Muys B. (2004) The AFFOREST-sDSS tutorial, pp. 43.
30. Gilliams S., Van Orshoven J., Muys B., Kros H., Heil G.W. et Van Deursen W. (2005) AFFOREST sDSS: a metamodel based spatial decision support system for afforestation of agricultural land. *New Forests*, **30**, 33-53.
31. Granier A., Reichstein M., Bréda N., Janssens I.A., Falge E., Ciais P., . . . Wang Q. (2007) Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, **143**, 123-145.
32. Hasenauer H., Moser M. et Eckmüllner O. (1995) MOSES- Ein Einzelbaumwachstumssimulator zur Modellierung von Wachstumsreaktionen. *Allg. Forstzeitschrift. München*. 50 (4), 216-218. *Allg. Forstzeitschrift. München*, **50**, 216-218.
33. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A. et Maskell K., eds (1996) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

34. IFN (2011) Indicateurs de gestion durable, pp. 200, Sens.
35. IGN (2013) Richesse et diversité.
36. IPCC (2007) Climate change 2007: Synthesis report. Cambridge University Press, pp. 52.
37. Iverson L.R. et Prasad A.M. (1998) Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the Eastern United States. *Ecological Monographs*, **68**, 465-485.
38. Iverson L.R., Prasad A.M., Matthews S.N. et Peters M. (2008) Estimating potential habitat for 134 eastern US tree species under six climate scenarios. *Forest ecology and management*, **254**, 390-406.
39. Jump A.S., Hunt J.M. et Peñuelas J. (2006) Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, **12**, 2163-2174.
40. Krajicek J.E., Brinkman K.A. et Gingrich S.F. (1961) Crown competition: a measure of density. *Forest Science*, **7**, 35-42.
41. Kros H. (2002) Evaluation of biogeochemical models at local and regional scale, pp. 284.
42. Larrieu L., Gonin P. et Coello J. (2012) Autécologie des feuillus : guide de lecture. *Forêt-entreprise*, **203**, 5-8.
43. Lemaire J. (2011) L'autécologie du chêne pédonculé est mieux cernée. *Forêt-entreprise*, **201**, 5-12.
44. Lexer M.J., Vacik H., Palmetzhofer D. et Oitzinger G. (2005) A decision support tool to improve forestry extension services for small private landowners in southern Austria. *Computers and Electronics in Agriculture*, **49**, 81-102.
45. Liebig J. (1844) Chimie appliquée à la physiologie végétale et à l'agriculture (G. M., trans.), pp. 544, Paris.
46. Masson G. (2005) Autécologie des essences forestières - Comment installer chaque essence à sa place ? (Tome 1), pp. 306. Lavoisier, Paris.
47. Matthews S.N., Iverson L.R., Prasad A.M., Peters M.P. et Rodewald P.G. (2011) Modifying climate change habitat models using tree species-specific assessments of model uncertainty and life history-factors. *Forest ecology and management*, **262**, 1460-1472.
48. Michelot A., Bréda N., Damesin C. et Dufrêne E. (2012) Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest ecology and management*, **265**, 161-171.
49. Millar C.I., Stephenson N.L. et Stephens S.L. (2007) Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications*, **17**, 2145-2151.
50. Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and Human Well-Being. Synthesis. A Report of the Millennium Ecosystem Assessment, Washington.
51. MLUR (2004) Waldbau-Richtlinie 2004. "Grüner Ordner" der Landesforstverwaltung Brandenburg, pp. 143, Potsdam.
52. Morin X., Fahse L., Scherer-Lorenzen M. et Bugmann H. (2011) Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecology Letters*, **14**, 1211-1219.
53. Party J.P. et Beaufils T. (2010) Catalogue des types de stations forestières du Vexin, du Valois et de la Vieille France pp. 292, Strasbourg.
54. Penman H.L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **193**, 120-145.
55. Piedallu C., Perez V., Gégout J.-C., Lebourgeois F. et Bertrand R. (2009) Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française*, **6**, 567-593.

56. Quine C.P. et White I.M.S. (1993) Revised windiness scores for the windthrow hazard classification: the revised scoring method, pp. 6. Research Division of the Forestry Authority, Edinburgh.
57. Rameau J.C., Mansion D. et Dumé G. (1989) Flore forestière française. Tome 1 : plaines et collines, Paris.
58. Ray D. (2008) Impacts of climate change on forests in Scotland – a preliminary synopsis of spatial modelling research. *Forestry Commission Research*, **Note 101**, 1-8.
59. Ray D., Xenakis G., Tene A. et Black K. (2009) Developing a site classification system to assess the impact of climate change on species selection in Ireland. *Journal of Irish Forestry*, 101-122.
60. Reboul J.B. (2011) Valorisation des stations et des habitats forestiers. Guide de reconnaissance et de gestion pour la région Centre, pp. 165. Leitmotiv, Orléans.
61. Reyer C., Leuzinger S., Rammig A., Wolf A., Bartholomeus R.P., Bonfante A., . . . Pereira M. (2012) A plant's perspective of extremes: Terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Global Change Biology*, n/a-n/a.
62. Reynolds K.M., Lexer M.J., Vacik H., Ray D., Shao G. et Borges J.G. (2008) Decision Support Systems in Forest Management. Dans: *Handbook on Decision Support Systems 2* (eds 499-533. Springer Berlin Heidelberg, Leipzig.
63. Riou-Nivert P. (2008) Changement climatique : questions des sylviculteurs et réponses des chercheurs. *Forêt-entreprise*, **180**, 14-27.
64. Saaty T.L. (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, **15**, 234-281.
65. Saxe H., Cannell M.G.R., Johnsen O., Ryan M.G. et Vourlitis G. (2001) Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, **149**, 369-399.
66. Scott L.S., Constance I.M. et Brandon M.C. (2010) Operational approaches to managing forests of the future in Mediterranean regions within a context of changing climates. *Environmental Research Letters*, **5**, 024003.
67. Steiner C. et Lexer M.J. (1998) Ein klimasensitives statisches Modell zur Beurteilung der Baumarteneignung. *Forstarchiv*, **69**, 92–103.
68. Thomas C.D., Cameron A., Green R.E., Bakkenes M., Beaumont L.J., Collingham Y.C., . . . Williams S.E. (2004) Extinction risk from climate change. *Nature*, **427**, 145-148.
69. Zhang Y., Chen H.Y.H. et Reich P.B. (2012) Forest productivity increases with evenness, species richness and trait variation: a global meta-analysis. *Journal of Ecology*, **100**, 742-749.