HAL open science

Vers un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique

Alice Michelot-Antalik, Sophie Gachet, Myriam Legay, Guy Landmann

To cite this version:

Alice Michelot-Antalik, Sophie Gachet, Myriam Legay, Guy Landmann. Vers un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique. Innovations Agronomiques, 2014, 41, pp.105-118. 10.17180/31g5-5q88 . hal-01122968

HAL Id: hal-01122968

https://hal.science/hal-01122968v1

Submitted on 31 Mar 2015

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Innovations Agronomiques 41 (2014), 105-118

Vers un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique

Michelot-Antalik A.[1], Gachet S.[2], Legay M.[3], Landmann G.[4]

[1] UMR 1121, Laboratoire Agronomie et Environnement Nancy Colmar, Université de Lorraine - INRA, 2 avenue de la forêt de Haye, 54505 Vandoeuvre-les-Nancy

[2] Aix Marseille Université, IMBE UMR 7263-CNRS-IRD-UAPV, 13397 Marseille

[3] ONF, Pôle R&D de Nancy, 11 rue de l'Ile de Corse, 54000 Nancy

[4] Ecofor, 42 rue Scheffer, 75116 Paris

Correspondance : alice.michelot@univ-lorraine.fr

Note : Cette contribution reprend en partie les conclusions du projet Traitaut (2012-2013). Elle est pour l'essentiel construite à partir d'une synthèse réalisée lors de son aboutissement (Michelot et al., 2013) et d'un article paru dans Forêt Entreprise (Michelot-Antalik et al., 2014).

Résumé

L'impact du changement climatique sur les écosystèmes forestiers incite dès à présent les gestionnaires à mettre en place des stratégies d'adaptation en termes de choix d'essences malgré l'incertitude des scénarios futurs. Pour y parvenir, une caractérisation quantifiée des exigences des essences par rapport au milieu est nécessaire. Le projet Traitaut visait ainsi à développer une nouvelle approche quantitative de l'autécologie des essences, en intégrant notamment les traits fonctionnels. Une communauté de recherche et développement et une plateforme web contenant une base de sources bibliographiques sur différentes essences ont été mises en place. L'analyse de la base de données TRY a montré que les traits fonctionnels peuvent être utilisés afin de paramétrer des modèles de croissance et de distribution des essences mais qu'il était essentiel d'enregistrer les valeurs des facteurs abiotiques pour chaque mesure de trait. L'étude et la comparaison des outils d'aide à la décision en Europe ont souligné la nécessité d'élaborer un tel outil en France et ont permis l'élaboration d'un cahier des charges pertinent pour sa construction.

Mots-clés : Adaptation, changement climatique, forêt, aide à la décision, autécologie, trait fonctionnel.

Abstract: Towards a decision support tool for the adaption of french forest to climate change

The impact of climate change on forest ecosystems now encourages managers to implement adaption strategies in terms of species choice despite the uncertainty of future scenarios. To achieve this, a quantified characterization of species ecological requirements is necessary. The project Traitaut thus aimed at developing a new quantitative approach to characterize the species autoecology, especially including the functional traits. A research and development community and a web platform including a database of bibliographic sources on different species were built. The analysis of the TRY database showed that functional traits can be used to the parameterization of growth and species distribution models but it is necessary to register the values of abiotic factors for each trait measurement. Study and comparison of the European decision support tools underlined the need to establish such a tool in France and they were used to do relevant specifications for the tool building.

Keywords: Autoecology, functional trait, modelling, management, computer-based tool.

1. Introduction

1.1. L'impact du changement climatique

Les forêts s'étendent sur 16 millions 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 km^2 d'après l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN). Des problématiques socio-économiques majeures y sont associées avec une filière représentant 450 000 emplois et un chiffre d'affaires annuel de 57 milliards d'euros (de l'Estoile, 2012). Leur multifonctionnalité assure un grand nombre de services écosystémiques[1] (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) :

- d'approvisionnement, comme la production de bois et de biomasse pour les constructions, l'ameublement, la pâte à papier et la production d'énergie renouvelable (enjeu d'importance croissante pour le développement durable) ;
- de régulation, comme 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 CO_2 annuelles ; l'amélioration de la qualité de l'eau, notamment *via* la diminution de la quantité de nitrates (Hansen et al., 2007) ; ou la présence d'habitats pour la conservation de la biodiversité ;
- d'aménités, comme la valeur paysagère, le tourisme avec 1010 million de visites d'individus par an (enquête du Laboratoire d'Economie Forestière (LEF) sur l'année 2001 ; IFN, 2011), ou la chasse.

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 et la concentration accrue de CO_2 dans l'atmosphère. Les sécheresses, en particulier, peuvent influencer directement les services écosystémiques (Granier et al., 2007 ; Allen et al., 2010). Ainsi, la défoliation des houppiers 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 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 en affectant la croissance radiale (Michelot et al., 2012) et la biodiversité (Thomas et al., 2004 ; Bellard et al., 2012).

1.2. Quelles stratégies d'adaptation ?

La durée de révolution des peuplements forestiers est en moyenne 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 requiert dès à présent la mise en place de **stratégies d'adaptation de la gestion forestière**. C'est un véritable défi pour les gestionnaires forestiers publics et privés qui devront adapter la composition de leurs peuplements, malgré des **incertitudes irréductibles sur la nature et**

[1] Bénéfices que tire la société de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes.

l'ampleur du changement climatique. En termes de choix d'essences, plusieurs stratégies, non exclusives les unes des autres, peuvent être envisagées :

- diversifier les provenances en place, ce qui permettrait une meilleure résilience aux aléas climatiques et par la suite une sélection des provenances résistantes au changement climatique ;
- augmenter le nombre d'essences différentes en favorisant les mélanges d'essences sur une même parcelle ou les mélanges de peuplements purs diversifiés à l'échelle du paysage ;
- planter des essences autochtones *via* la migration assistée[2], ou des essences allochtones déjà utilisées en France ou non.

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...) mais aussi par l'évaluation des conséquences sur le fonctionnement des écosystèmes dans l'ensemble de ces composantes.

1.3. Une rénovation des approches

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 de chaque espèce aux facteurs abiotiques** (température, précipitations, fertilité minérale...). En France, l'autécologie a été décrite à partir des études de relations station[3]-production qui ont vu le jour dans les années 1970. 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 inventorient et décrivent les différents types de contextes pédoclimatiques présents dans une région naturelle. Pour la prise en compte du changement climatique, il apparaît essentiel de rénover ces approches :

- en renonçant à cette approche typologique au profit d'une approche analytique séparant les effets des variables de sols et de climat ;
- en incluant différentes variables biologiques (de phénologie, physiologie, distribution...) reliées quantitativement aux facteurs abiotiques ;
- en quantifiant les seuils biologiques de réponse des essences aux facteurs abiotiques ;

[2] Déplacement d'espèces assisté par l'homme en réaction aux changements climatiques.

[3] 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.

- en élaborant des outils informatiques opérationnels.

1.4. La nécessité de développer des outils opérationnels

Concernant les outils informatiques d'aide à la décision, la France a pris un certain retard par rapport à ces voisins européens. Depuis plus d'une décennie en effet, plusieurs pays européens (Royaume-Uni, Autriche, Belgique, Danemark, Pays-Bas) développent des outils d'aide à la décision à destination des gestionnaires. Ces outils intègrent l'autécologie des essences forestières afin de proposer des stratégies adaptatives de gestion forestière. Parmi les 75 outils listés par l'action COST européenne FORSYS (2009-2013), un seul est recensé pour la France : CAPSIS. Il s'agit d'une plateforme de développement de modèles de croissance et de dynamique forestière qui est utilisée par exemple pour l'établissement de guides de sylviculture par l'Office National des Forêts (ONF). Cependant, à l'heure actuelle, seul un nombre restreint de modèles intégrés dans CAPSIS prennent en compte l'effet du changement climatique, même si leur nombre tend à augmenter. Très récemment, une synthèse sur les outils informatiques pour l'aide à l'aménagement forestier a été établie dans le cadre du projet FORSYS (Borges et al., 2014). Parmi les 26 pays dont les outils sont présentés et analysés, 19 se trouvent en Europe mais la France en est absente, n'ayant pas d'outil de ce type à présenter.

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. **Des organismes comme le GIP Ecofor et le RMT Aforce ont un rôle prépondérant à jouer** pour organiser la mise en place de ces outils, matérialisation du transfert entre la recherche fondamentale forestière et la gestion des forêts et de l'ensemble de son continuum.

2. Autécologie et traits fonctionnels

2.1. Quelques définitions

Le sens et l'usage du terme « autécologie » ont largement évolué au cours du temps. Historiquement, ce mot 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 son environnement. Pierre Dansereau, écologue québécois, est l'un des premiers à détailler les principes de la division de l'écologie en « autécologie » et « synécologie[4] » dans « Biogeography: an Ecological Perspective » paru en 1957. L'autécologie a donc été utilisée en physiologie puis en biogéographie en la reliant aux capacités d'adaptation des espèces aux facteurs du milieu, sans considérer les interactions entre les êtres vivants. Elle devait initialement permettre d'expliquer la répartition des espèces à différentes échelles spatiales mais a rapidement buté sur un obstacle : la répartition d'une espèce est non seulement due à des facteurs abiotiques, mais également aux interactions entre êtres vivants. 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 végétale.

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 en incluant la réponse biologique des espèces aux facteurs biotiques, ainsi que les différents niveaux d'organisation du vivant. La prise en compte de la modification rapide des conditions climatiques incite à repenser cette approche en incluant cette fois des variables biologiques reliées

[4] Etude des interactions biotiques entre différentes espèces vivant dans le même milieu.

quantitativement aux facteurs abiotiques et biotiques et au fonctionnement des écosystèmes, comme par exemple les **traits fonctionnels**. Ce sont des **caractéristiques mesurables influençant la survie et la reproduction des arbres**, telles que la surface des feuilles, la taille des graines, la densité du bois ou encore la capacité photosynthétique (Violle et al., 2007).

2.2. Les objectifs du projet Traitaut

D'une durée d'un an (2012-2013), le projet Traitaut (co-financé par le GIP Ecofor et le RMT Aforce) s'est inscrit dans la recherche d'une nouvelle approche de l'autécologie pour faciliter l'adaptation des forêts au changement climatique. Afin d'organiser une dynamique collective à l'échelle nationale, il a réuni les chercheurs, agents du développement, gestionnaires et décideurs. Ses objectifs étaient les suivants :

1. constituer une communauté recherche et développement (R&D) dans le domaine de l'autécologie des essences forestières et des traits fonctionnels ;
2. étudier l'apport des traits fonctionnels pour l'approche quantitative de l'autécologie ;
3. réaliser une synthèse clarifiant les contours de l'autécologie et décrivant son utilisation dans les outils d'aide à la décision dans le contexte du changement climatique ;
4. établir un cahier des charges pour l'élaboration d'un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique.

Une consultation élargie d'experts a permis d'établir une **liste de 23 essences forestières**, pour lesquelles l'information autécologique a été recueillie prioritairement, en considérant quatre catégories d'espèces (Tableau 1), pour lesquelles les sources et le niveau de connaissances autécologiques pouvaient différer.

Tableau 1. Liste des essences dont les informations autécologiques sont recueillies prioritairement.

Type	Nom commun	Nom latin
Essence principale	Sapin pectiné, Châtaignier, Hêtre, Épicéa, Pin maritime, Pin sylvestre, Chêne vert, Chêne sessile, Chêne pubescent, Chêne pédonculé	*Abies alba*, *Castanea sativa*, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Quercus ilex*, *Quercus petraea*, *Quercus pubescens*, *Quercus robur*
Essence secondaire	Érable plane, Érable sycomore, Aulne de Corse, Bouleau, Merisier, Cormier, Tilleul à petites feuilles	*Acer platanoides*, *Acer pseudoplatanus*, *Alnus cordata*, *Betula pendula*, *Prunus avium*, *Sorbus domestica*, *Tilia cordata*
Essence allochtone utilisée	Cèdre de l'Atlas, Pin laricio, Douglas, Robinier faux acacia	*Cedrus atlantica*, *Pinus nigra ssp laricio var corsica*, *Pseudotsuga menziesii*, *Robinia pseudoacacia*
Essence allochtone non utilisée	Sapin de Nordmann, Eucalyptus	*Abies nordmanniana*, *Eucalyptus globulus*

3. Les avancées du projet Traitaut

3.1. La plateforme web : un espace d'échanges et une base de sources bibliographiques

Une plateforme web a été mise en place lors du projet pour constituer une communauté R & D (http://traitaut.gip-ecofor.org). Elle contient :

- un **annuaire** des membres ;
- un recensement des **outils** (logiciel, cartographies…) intégrant l'autécologie des essences forestières dans le contexte du changement climatique ;
- un **espace d'échanges** sur les projets et travaux en lien avec Traitaut ;
- une **base de sources bibliographiques**.

Cette base de sources bibliographiques est libre d'accès pour la consultation ou pour l'ajout de nouvelles publications (après simple inscription). Les publications peuvent être triées par essence, facteur abiotique, facteur biotique, type de réponse biologique et type d'approche (Tableau 2), facilitant ainsi la recherche et l'appréciation des contenus.

Tableau 2. Critères de tri des publications recensées sur le site internet Traitaut

Catégorie	Critère de tri
Facteur climatique	Température, rayonnement, vent, précipitations, humidité de l'air, brouillard, évapotranspiration potentielle, gel, neige
Facteur édaphique	Réserve utile, alimentation hydrique, engorgement, richesse minérale, C/N, pH, type d'humus, profondeur utile, profondeur de carbonatation, texture
Facteur biotique	Insecte, champignon, organisme symbiotique, autre
Type de réponse	Productivité, répartition, qualité du bois, état sanitaire, phénologie, capacité de dispersion, résistance
Type d'approche	Physiologie, écophysiologie, écologie des populations, écologie des communautés, écologie du paysage, génétique, dendrochronologie, sciences forestières

3.2. L'apport des traits fonctionnels

Les traits fonctionnels permettent de caractériser la réponse du peuplement forestier à son environnement (p. ex. climat, pratiques de gestion) et peuvent avoir un effet direct sur le fonctionnement de la forêt (p. ex. capture de la lumière, dispersion des graines). Afin de déterminer l'apport des traits fonctionnels pour l'approche quantitative de l'autécologie, la **base de données TRY** (Kaatge et al., 2011) a été utilisée. Elle regroupe 93 bases de données différentes[5] et 52 traits pour un total de 300 000 espèces végétales à l'échelle mondiale. Nous avons consulté les valeurs de 35 traits pour la liste des 23 essences forestières retenues.

La consultation de la base TRY a montré qu'elle contient un grand nombre de données avec des traits variés (traits foliaires, échanges gazeux, anatomie du bois...). Les espèces qui présentent le plus grand nombre de valeurs de traits sont le Pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), l'Épicéa commun (*Picea abies*), le Chêne vert (*Quercus ilex*), le Chêne sessile (*Quercus petraea*) et le Hêtre (*Fagus sylvatica*). Les **traits foliaires** représentent plus de la moitié des valeurs dans la base (Figure 1). La variabilité des valeurs de traits au sein d'une même essence et du nombre de mesures rend difficile l'obtention d'une moyenne comparable entre essences (exemple pour la densité du bois, Figure 2).

Les données de TRY pourraient cependant être utilisées afin de **paramétrer des modèles** de croissance et de distribution des essences nécessaires au fonctionnement d'outils d'aide à la décision. En revanche, pour notre approche, il manque généralement les valeurs des facteurs abiotiques pour

[5] Les bases de données élémentaires qui constituent TRY regroupent un ensemble de mesures de traits pour un nombre variable d'espèces à différentes échelles géographiques.

chaque mesure, qui seraient indispensables à la construction des **courbes de réponse** de chaque essence aux facteurs abiotiques.

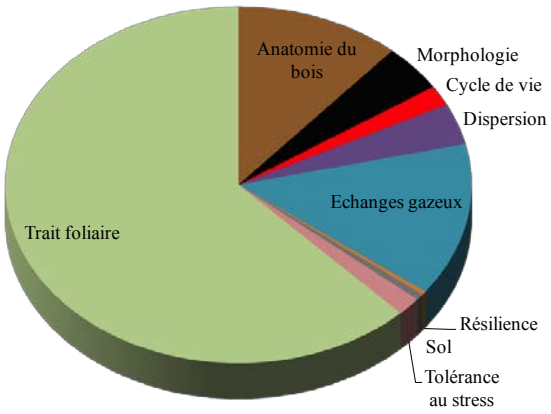

Figure 1. Répartition des traits par catégorie d'après la consultation de la base TRY. Les traits de la catégorie « sol » sont la vitesse de décomposition de la litière et la profondeur des racines.

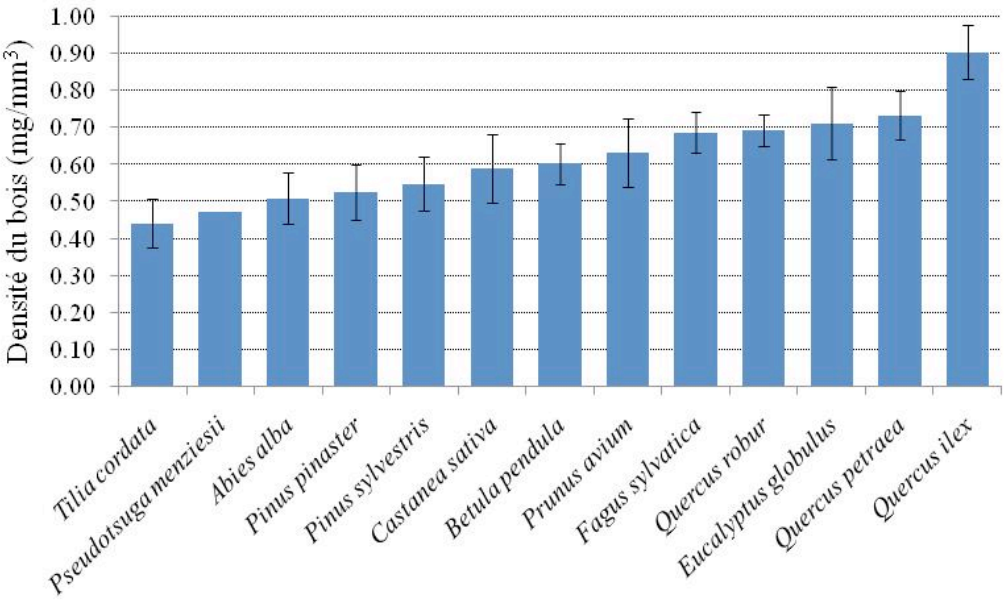

Figure 2. Densité moyenne du bois par espèce (± écart-type) d'après la consultation de la base TRY. Le nombre de valeurs moyennées par essence varient de 1 (*Pseudotsuga menziesii*) à 1252 (*Pinus sylvestris*) suivant le nombre variable de mesures réalisées pour les différentes bases de données constituant TRY.

3.3. Zoom sur les outils d'aide à la décision dans d'autres pays

Pour atteindre l'objectif final du projet Traitaut, à savoir, établir 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. 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://www.forestdss.org/CoP) 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. Trois outils ont particulièrement retenu notre attention et sont présentés dans les paragraphes suivants. Des schémas simples et des synthèses ont été réalisés pour expliciter le fonctionnement des différents outils à partir des publications scientifiques

qui les décrivent. Les points forts et les limites de ces outils sont également analysés afin de constituer le cahier des charges nécessaire au fondement d'un outil français d'aide à la décision.

3.3.1. Le logiciel ESC (Ecological Site Classification)

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.** Sa structure est composée d'une interface utilisateur et système d'information géographique (SIG). Son fonctionnement général est présenté dans la Figure 3**.**

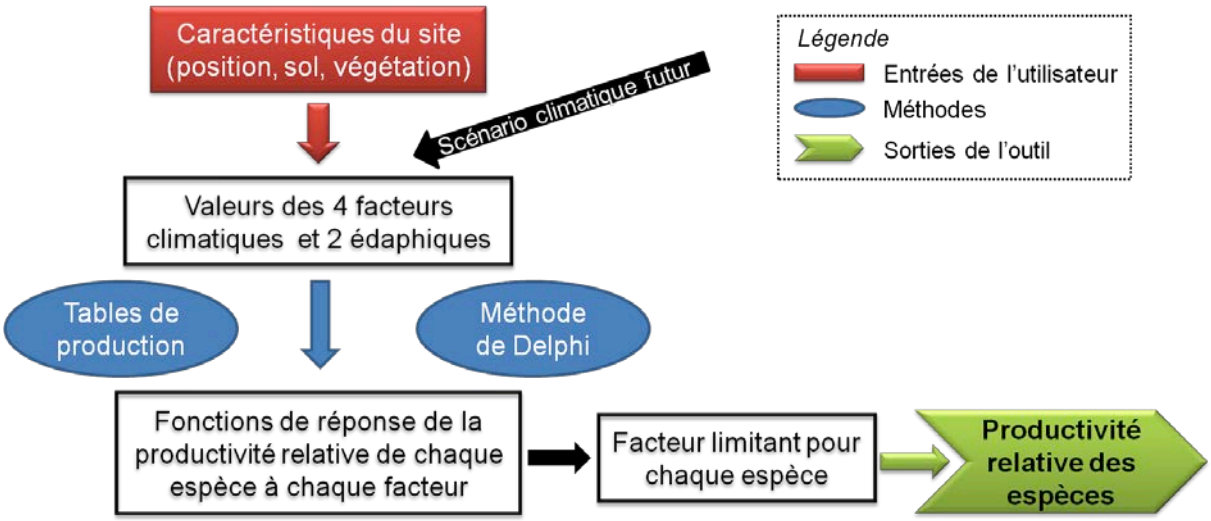

Figure 3. Schéma général du fonctionnement du logiciel ESC.

Dans cet outil, des fonctions de réponse à dire d'experts décrivent la productivité relative de chaque essence (16 feuillus et 12 conifères) sur chaque site selon quatre facteurs climatiques (température cumulée, déficit hydrique, exposition au vent, continentalité) et deux facteurs édaphiques (humidité du sol, fertilité minérale). Ces **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 de Delphi**. Celle-ci 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, communication personnelle). Les valeurs seuils de cette productivité permettent de définir l'acclimatation de l'essence pour la période de référence (1961-1990) mais également pour deux périodes futures (2036-2065 et 2066-2095) où la température cumulée et le déficit hydrique sont modifiés 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). Des cartes, à une résolution spatiale de 1 ha, permettent de visualiser les changements d'acclimatation de chaque essence forestière entre ces deux périodes. Cet outil présente l'avantage d'être simple d'utilisation pour les gestionnaires et fonctionne à l'échelle nationale. En revanche, la productivité est la seule réponse qui est prédite et les fonctions de réponse sont construites à partir des concertations d'un nombre limité d'experts, sans réelle validation scientifique.

3.3.2. Le logiciel AFFOREST

Le logiciel d'aide à la décision AFFOREST (Gilliams et al. 2004 ; Gilliams et al., 2005) est issu d'un projet européen 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 terrains 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[6], d'une plateforme SIG et d'une interface utilisateur. Son fonctionnement est représenté schématiquement dans la Figure 4.

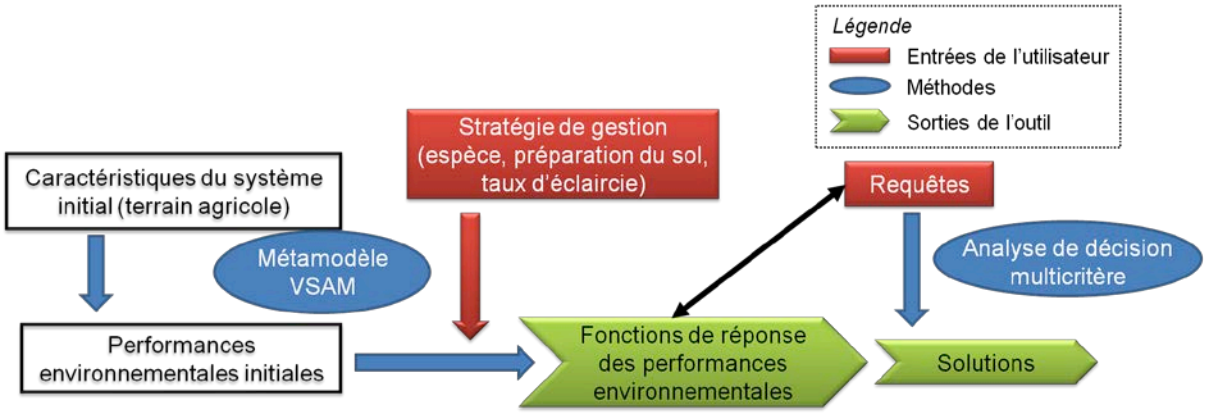

Figure 4. Schéma général du fonctionnement de l'outil Afforest.

Au démarrage du logiciel, l'utilisateur renseigne trois types de stratégies :

- 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 (terrain agricole), déjà stockés dans l'outil, sont le type de sol, la quantité moyenne annuelle 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** : la séquestration du carbone ($kg.ha^{-1}.an^{-1}$), le lessivage des nitrates ($kg.ha^{-1}.an^{-1}$) et la 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 (Kros, 2002). A partir des stratégies de gestion rentrées par l'utilisateur et des paramètres initiaux, le métamodèle VSAM simule la réponse des trois performances environnementales au cours du temps.

Le module correspondant à la prise de décision est indépendant de la base de données spatialisées. 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.

[6] Version simplifiée d'un modèle.

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. Le logiciel propose une ou plusieurs solutions à l'utilisateur selon sa requête.

Cet outil permet de rendre accessible aux gestionnaires des approches basées sur les processus biologiques par le biais d'une version simplifiée du modèle d'origine. Cependant, il est limité concernant le choix d'espèces (restreint à quatre) et n'intègre pas l'effet des scénarios climatiques futurs.

3.3.3. Le logiciel DSD (Decision Support Dobrova)

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 fonctionnement est représenté schématiquement dans la Figure 5**.**

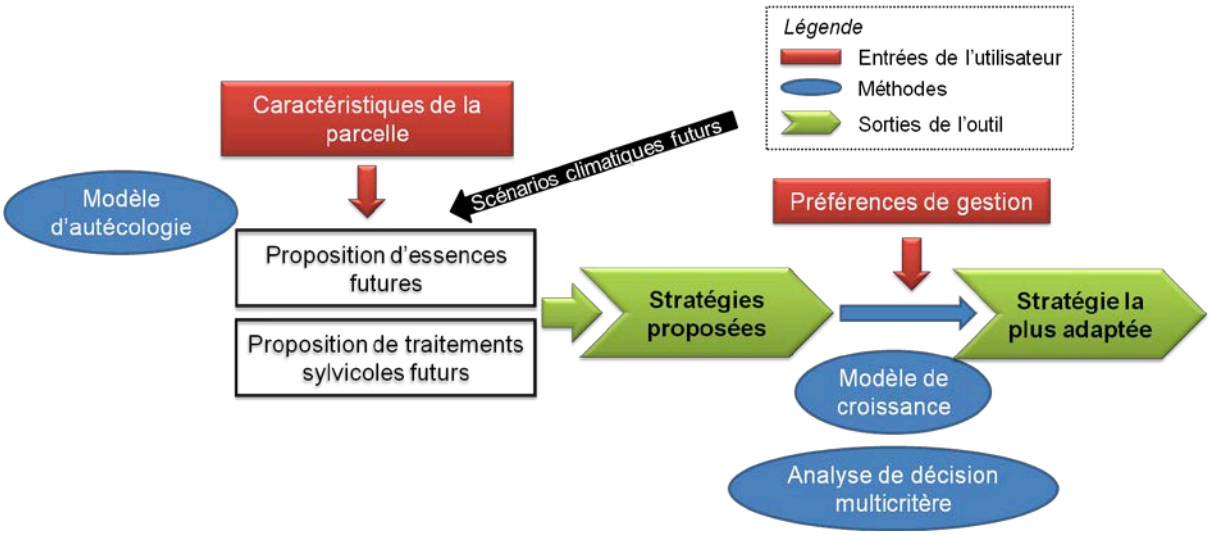

Figure 5. Schéma général du fonctionnement de l'outil DSD.

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 structuraux prédéfinis dans la base de données. 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.

Parallèlement, 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** que 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.

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. Ainsi, l'utilisateur a sélectionné plusieurs stratégies futures avec une combinaison différente de choix d'espèces et de traitements sylvicoles.

Une **analyse de décision multicritère** a été développée dans cet outil pour attribuer un rang aux stratégies selon leur score en regard des objectifs à atteindre et aider ainsi l'utilisateur à trouver une solution correspondant à ces préférences. Le rang des stratégies dépend des valeurs d'indicateurs à court terme (30 ans) et à long terme (100 ans) calculés à partir de données quantitatives mais également de dires d'experts pour les indicateurs qualificatifs.

Cet outil s'inscrit dans les préoccupations actuelles d'adaptation de la gestion forestière en prenant en compte les incertitudes et les risques écologiques et économiques ainsi que des choix d'essences en peuplement pur ou mélangé. Cette approche complète est cependant établie sur une faible étendue spatiale et les scénarios climatiques considérés sont limités.

3.4. Vers un outil informatisé d'aide à la décision en France

Le projet Traitaut a abouti à un cahier des charges et à un pré-projet pour la construction d'un **outil français** (Figure 6) visant à aider les gestionnaires forestiers privés et publics dans leur choix en contexte de changement climatique. Une **co-construction de l'outil** associant gestionnaires et chercheurs est primordiale, afin d'assurer son adéquation aux besoins des gestionnaires et son utilisation dans les pratiques.

Les **modèles écologiques utilisés dans l'outil** peuvent être développés aux trois échelles spatiales impliquant des décisions de gestion adaptative : nationale, régionale et locale (parcelle et massif). Ils permettent de simuler la productivité et l'aire de distribution potentielle des essences à l'horizon 2050-2100 à partir d'un ensemble de facteurs climatiques et édaphiques. Un des défis dans l'utilisation de ces modèles à des fins d'aide à la décision est le passage d'une échelle spatiale écologiquement large à une échelle plus petite, ce qui implique l'obtention des facteurs climatiques et édaphiques à une faible résolution sans trop augmenter la marge d'incertitude. Des **sites expérimentaux** doivent impérativement être suivis dans différentes régions pour valider de tels modèles à l'échelle locale ou régionale.

Planter une essence potentiellement adaptée au climat futur ne suffira pas à assurer l'avenir d'un peuplement face au changement climatique car les choix de gestion sont aussi déterminants. C'est pourquoi il est nécessaire de **coupler ces modèles écologiques à des modèles de simulation de croissance** contenant des itinéraires sylvicoles. Ce type de modèles existe déjà et la plupart des modèles développés en France sont regroupés sous la plateforme Capsis (Dufour-Kowalski et al., 2012). De plus, les interactions biotiques au sein de l'écosystème et leur évolution temporelle sont à prendre en considération dans des stratégies d'adaptation à long terme.

Ces stratégies doivent parallèlement être évaluées d'un point de vue **socio-économique**, à travers des modèles, pour envisager les risques pour les gestionnaires en prenant en compte le spectre d'incertitudes liées au changement climatique. L'approche économique peut être également utilisée pour évaluer l'apport de la diversification en essences, la quantité de carbone séquestré, voire pour analyser ce qui guide les choix de gestion des propriétaires forestiers en contexte incertain.

Enfin, l'élaboration de cet outil doit se faire progressivement dans une plateforme dédiée. La construction de cette plateforme doit garantir sa **pérennité**, en intégrant l'évolution rapide des connaissances et des modèles, et sa **facilité d'accès et d'utilisation** pour les différents utilisateurs ciblés.

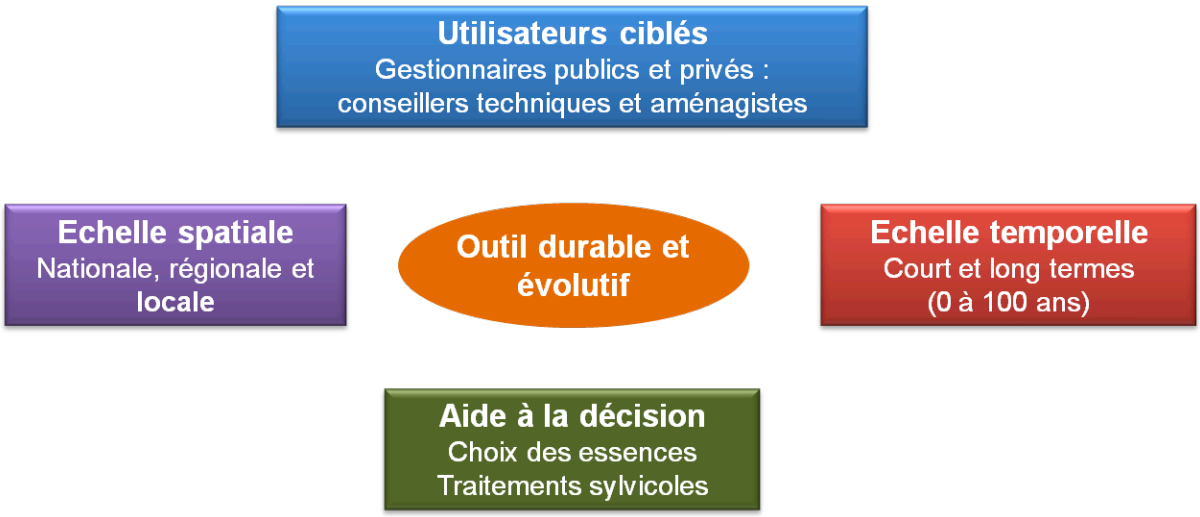

Figure 6. Schéma général du cahier des charges pour l'élaboration d'un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts au changement climatique.

4. Conclusion et perspectives

Le projet Traitaut a rassemblé une communauté de recherche et développement autour des questions de stratégies adaptatives en contexte de changement climatique. Il a abouti à une plateforme web interactive et à une vision plus intégrative des écosystèmes forestiers intégrant non seulement l'autécologie des essences mais aussi la possibilité d'utiliser les traits fonctionnels et plus généralement de prendre en considération la multifonctionnalité des forêts. L'analyse des 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. Dès sa préfiguration, l'outil doit être envisagé comme évolutif pour qu'il puisse être durable et intégrer les nouvelles connaissances scientifiques. La comparaison et l'association des différents modèles existants qui simulent la réponse des essences au climat permettront de mieux prendre en compte la variabilité de ces simulations et les incertitudes au sein de cet outil. Il 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...) L'objectif serait de prendre en compte 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 considérer la gamme des incertitudes dans les solutions proposées aux gestionnaires. **Cet outil constituerait ainsi une innovation majeure** dans le dialogue entre recherche et gestion forestières et l'adaptation des forêts au changement climatique.

Références bibliographiques

Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H., Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., 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.

Becker M., Le Tacon F., Timbal J., 1980. Les Plateaux calcaires de Lorraine. Types de stations et potentialités forestières. Nancy, 268 p.

Bellard C., Bertelsmeier C., Leadley P., Thuiller W., Courchamp F., 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. Ecology Letters 15, 365-377.

Bertrand R., Lenoir J., Piedallu C., Riofrio-Dillon G., de Ruffray P., Vidal C., Pierrat J.-C., Gégout J.-C., 2011. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. Nature 479, 517-520.

Borges, J.G., Nordström E.M., Garcia-Gonzalo, J., Hujala T., Trasobares, A. (Eds.), 2014. Computer-based tools for supporting forest management. The experience and the expertise world-wide. Report of Cost Action FP 0804 Forest Management Decision Support Systems (FORSYS). Umea, 503 p.

Bréda N., 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.

Bréda N., Huc R., Granier A., 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.

Carnicer J., Coll M., Ninyerola M., Pons X., Sánchez G., 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 108, 1474-1478.

Choat B., Jansen S., Brodribb T.J., Cochard H., Delzon S., Bhaskar R., Bucci S.J., Feild T.S., Gleason S.M., Hacke U.G., Jacobsen A.L., Lens F., Maherali H., Martínez-Vilalta J., Mayr S., Mencuccini M., Mitchell P.J., Nardini A., Pittermann J., Pratt R.B., Sperry J.S., Westoby M., Wright I.J., Zanne A.E., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. Nature 491, 752-755.

Davis M.B., Shaw R.G., 2001. Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change. Science 292 673-679.

De l'Estoile M., 2012. La valorisation de la forêt française. Section de l'agriculture, de la pêche et de l'alimentation, 96 p.

Edwards P.N., Christie J.M., 1981. Yield models for forest management 48. HMSO, London.

Gilliams S., Van Orshoven J., Hansen K., Skov-Petersen H., Muys B., 2004. The AFFOREST-sDSS tutorial. 43 p.

Gilliams S., Van Orshoven J., Muys B., Kros H., Heil G.W., Van Deursen W., 2005. AFFOREST sDSS: a metamodel based spatial decision support system for afforestation of agricultural land. New Forests 30, 33-53.

Granier A., Reichstein M., Bréda N., Janssens I.A., Falge E., Ciais P., Grünwald T., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Facini O., Grassi G., Heinesch B., Ilvesniemi H., Keronen P., Knohl A., Köstner B., Lagergren F., Lindroth A., Longdoz B., Loustau D., Mateus J., Montagnani L., Nys C., Moors E., Papale D., Peiffer M., Pilegaard K., Pita G., Pumpanen J., Rambal S., Rebmann C., Rodrigues A., Seufert G., Tenhunen J., Vesala T., 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.

Hansen K., Rosenqvist L., Vesterdal L., Gundersen P., 2007. Nitrate leaching from three afforestation chronosequences on former arable land in Denmark. Global Change Biology 13, 1250-1264.

Hasenauer H., Moser M., Eckmüllner O., 1995. MOSES– Ein Einzelbaumwachstumssimulator zur Modellierung von Wachstumsreaktionen. Allg. Forstzeitschrift. München 50 (4), 216–218.

Houghton J.T., Meira Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K., (Eds.), 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

IFN, 2011. Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines, Edition 2010. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire, Sens, 200 p.

Jump A.S., Hunt J.M., Penuelas J., 2006. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of Fagus sylvatica. Global Change Biology 12, 2163-2174.

Kattge J., Diaz S., Lavorel S., Prentice I.C., Leadley P., 2011. TRY – A global database of plant traits. Global Change Biology 17(9), 2905-2935.

Kros H., 2002. Evaluation of biogeochemical models at local and regional scale, Ph. D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 284 p.

Lexer M.J., Vacik H., Palmetzhofer D., 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.

Michelot A., Bréda N., Damesin C., 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.

Michelot A., Gachet S., Legay M., Landmann G., 2013. L'autécologie des essences forestières et son intégration dans les outils d'aide à la décision : synthèse et évaluation. 44 p.

Michelot-Antalik A., Gachet S., Legay M., Landmann G., 2014. Vers un outil d'aide à la décision pour l'adaptation des forêts françaises au changement climatique. Forêt Entreprise 217, 30-33.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being. Synthesis. A Report of the Millennium Ecosystem Assessment, Washington.

Reynolds K.M., Lexer M.J., Vacik H., Ray D., Shao G., Borges J.G., 2008. Decision Support Systems in Forest Management. In: Handbook on Decision Support Systems 2. Springer Berlin Heidelberg, Leipzig, p. 499-533.

Riou-Nivert P., 2008. Changement climatique : questions des sylviculteurs et réponses des chercheurs. Forêt-entreprise 180, 14-27.

Saaty T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology 15, 234-281.

Steiner C., Lexer M.J., 1998. Ein klimasensitives statisches Modell zur Beurteilung der Baumarteneignung. Forstarchiv 69, 92–103.

Thomas C.D., Cameron A., Green R.E., Bakkenes M., Beaumont L.J., Collingham Y.C., Erasmus B.F.N., de Siqueira M.F., Grainger A., Hannah L., Hughes L., Huntley B., van Jaarsveld A.S., Midgley G.F., Miles L., Ortega-Huerta M.A., Peterson A.T., Phillips O.L., Williams S.E., 2004. Extinction risk from climate change. Nature 427, 145-148.

Violle C., Navas M.-L., Vile D., Kazakou E., Fortunel C., Hummel I., Garnier E., 2007. Let the concept of trait be functional! Oikos 116, 882-892.