



Organisation des Nations Unies
pour l'alimentation
et l'agriculture

Simulation de l'effet du changement climatique sur la dynamique des peuplements forestiers au Maroc

Le cas de la forêt de la Mâamora



Simulation de l'effet du changement climatique sur la dynamique des peuplements forestiers au Maroc

Le cas de la forêt de la Mâamora

Renaud Colmant

Division du climat, de l'énergie et des régimes fonciers

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

Rome, Italy

Pr. Fouad Mounir

École Nationale Forestière d'Ingénieurs

Salé, Maroc

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. La mention de sociétés déterminées ou de produits de fabricants, qu'ils soient ou non brevetés, n'entraîne, de la part de la FAO, aucune approbation ou recommandation desdits produits de préférence à d'autres de nature analogue qui ne sont pas cités.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles du/des auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement les vues ou les politiques de la FAO.

ISBN 978-92-5-209030-4

© FAO, 2015

La FAO encourage l'utilisation, la reproduction et la diffusion des informations figurant dans ce produit d'information. Sauf indication contraire, le contenu peut être copié, téléchargé et imprimé aux fins d'étude privée, de recherches ou d'enseignement, ainsi que pour utilisation dans des produits ou services non commerciaux, sous réserve que la FAO soit correctement mentionnée comme source et comme titulaire du droit d'auteur et à condition qu'il ne soit sous-entendu en aucune manière que la FAO approuverait les opinions, produits ou services des utilisateurs.

Toute demande relative aux droits de traduction ou d'adaptation, à la revente ou à d'autres droits d'utilisation commerciale doit être présentée au moyen du formulaire en ligne disponible à www.fao.org/contact-us/licence-request ou adressée par courriel à copyright@fao.org.

Les produits d'information de la FAO sont disponibles sur le site web de la FAO (www.fao.org/publications) et peuvent être achetés par courriel adressé à publications-sales@fao.org.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Méthode	3
2.1. Conception expérimentale	3
2.2. Présentation de la zone d'étude	4
Situation géographique, administrative et forestière	4
Climat	5
Topographie	6
Pédologie	6
Végétation forestière	6
Activités anthropiques	6
Gestion forestière	7
2.3. Les données climatiques	7
2.4. La carte des communautés initiales	9
2.5. Les paramètres des espèces	9
2.6. La calibration des espèces	11
2.7. Les écorégions	12
2.8. Données complémentaires avec gestion forestière	13
3. Résultats	15
3.1. Résultats du test du modèle sans perturbation	15
Distribution	15
Biomasse	16
3.2. Résultats du test du modèle avec gestion forestière appliquée	18
3.3. Comparaison des simulations avec et sans gestion forestière	19
Distribution	19
Biomasse	20
Le cas du <i>Quercus suber</i>	21
Le liège	22
4. Conclusion et recommandations	23
5. Utilité et Critiques du modèle	25
6. Références	27

1. Introduction

Les forêts à travers le monde sont touchées par les changements globaux, comme le changement climatique, qui affectent la croissance des forêts et la concurrence (GIEC, 2007), les variations dans la composition atmosphérique (Pitelka *et al.*, 1997; Thuiller *et al.*, 2008) et l'introduction des ravageurs exotiques (Aukema *et al.*, 2010). Ces modifications produisent des changements spécifiques dans les caractéristiques du paysage et leur dynamique à des échelles spatiales et temporelles distinctes (Laughlin *et al.*, 2004; Lui and Mladenoff, 1999). Beaucoup de ces changements sont sans précédent, et de leurs effets et les interactions avec d'autres processus écologiques sont incertains.

Au cours des 30 dernières années, le monde a connu d'importantes hausses de température, en particulier dans l'hémisphère nord (IPCC, 2013). En attendant, une plus grande variabilité du climat est prévue, avec des précipitations augmentées dans certaines zones et les périodes sèches et chaudes extrêmes dans d'autres régions. Ces événements auront un effet important sur les forêts.

Des températures légèrement plus élevées et une plus grande accumulation de CO₂ dans l'atmosphère accélèrent les taux de croissance des espèces dans les écosystèmes forestiers. On estime que les forêts des régions tempérées ont vu un gain de 15% de la productivité depuis le début du 20^{ème} siècle (Medlyn *et al.*, 2000). En outre, les amendements de CO₂ ainsi que les niveaux d'azote accrus et plus d'humidité du sol, ont contribué à une plus grande productivité de la forêt au cours du siècle dernier. La variabilité du climat peut aussi causer la baisse de productivité. Lors de la vague de chaleur de 2003 en Europe, il y avait une baisse de 30% de la productivité des plantes en Europe continentale dans son ensemble.

Dans le cas du Maroc, l'influence du changement climatique sur les écosystèmes forestiers n'est pas clairement mise en évidence. Le changement climatique constitue un grand défi pour les forêts, menaçant potentiellement les populations qui dépendent notamment de la production alimentaire et du bois local pour leur subsistance. Les forêts au Maroc ont de nombreuses fonctions telles que la production de bois d'œuvre, de bois de chauffage, de produits forestiers non ligneux et de l'élevage du bétail.

Les forêts marocaines souffrent beaucoup plus de la pression humaine et animale que des changements climatiques. Mais la maîtrise de la composante climatique est d'une importance capitale. Acquérir de l'information sur les impacts potentiels du changement climatique est la clé dans l'élaboration des plans nationaux et des politiques nationales d'adaptation. Compte tenu des grandes incertitudes quant à l'avenir du climat et de la réponse des systèmes naturels et humains, les modèles de simulations offrent la possibilité intéressante de tester des scénarios, d'explorer les impacts potentiels et de comprendre comment les différents processus interagissent les uns avec les autres.

Dans le cadre du programme conjoint de l'UE et de la FAO sur l'amélioration de la gouvernance mondiale pour la réduction de la faim, la FAO a mis au point un système intégré afin d'effectuer des évaluations des impacts du changement climatique au niveau national. Ce système basé sur un serveur appelé MOSAICC (système de modélisation des impacts du Changement Clima-

tique sur l'agriculture) a été construit en collaboration avec diverses institutions scientifiques en Europe (universités, centres de recherche). Le modèle qui sert pour la simulation de la dynamique forestière est intégré dans MOSAICC et se nomme LANDIS-II Pn-ET succession.

Dans la zone pilote de la forêt de la Maâmora, nous avons cherché à identifier presque tous les facteurs qui peuvent influencer sur la vulnérabilité de cet écosystème. Cet écosystème est complexe; il produit du liège (chêne-liège), du bois d'œuvre (eucalyptus, pins), et des tanins (acacias) et subit entre autre la pression de l'homme et du bétail. Le chêne-liège a connu une diminution de sa distribution et de sa biomasse durant le 20e siècle, malgré la gestion des forêts visant à le régénérer tout en gardant la production de bois et d'autres fonctions de la forêt rentables. Les gestions futures devront intégrer les incidences du changement climatique sur ces services. Nous avons effectué des simulations de l'évolution des peuplements dans le temps suivant différents scénarios climatiques afin d'examiner la façon dont le changement climatique favorise certaines espèces d'arbres et comment cela se rapporte aux objectifs de gestion.

2. Méthode

2.1. Conception expérimentale

L'étude a été menée à l'aide de la plateforme MOSAICC (Modelling System for Agricultural Impacts of Climate Change) MOSAICC est une plateforme intégrée regroupant un ensemble de modèles et d'outils pour évaluer les impacts des changements climatiques à l'échelle nationale. Son architecture a été développée dans le but de permettre aux différents experts de collaborer à distance quel que soit leurs appartenances (ministères, universités, institutions de recherche) en utilisant leurs propres données. C'est aussi un outil de renforcement des capacités en matière de modélisation et de simulation.

Le but de MOSAICC est d'évaluer les impacts du changement climatique sur l'agriculture, les ressources forestières et l'économie grâce à la modélisation en Combinant des modèles interdisciplinaires utilisés de manière spatialement explicite dans une perspective d'aide à la décision au niveau national. C'est un système de modèles conçus pour mener à bien chaque étape de l'évaluation de l'impact des scénarios climatiques depuis la réduction d'échelle jusqu'à l'analyse de l'impact économique au niveau national.

Le modèle qui sert pour la simulation de la dynamique de la composante forestière est intégré dans MOSAICC et se nomme LANDIS-II. Ce modèle simule les perturbations et la succession forestière dans de larges paysages variant de l'ordre de millier à des millions d'hectares, avec des tailles de cellule généralement allant de 10 à 250 mètres de résolution. Le groupement des cellules individuelles avec des paramètres climatiques et pédologiques homogènes constitue les écorégions. Par conséquent, la probabilité que les espèces d'arbres peuvent s'établir avec succès varie selon les écorégions (Scheller and Mladenoff, 2004). Pour réduire la complexité du modèle et limiter les besoins en capacité mémoire de l'ordinateur, LANDIS-II s'intéresse aux cohortes (espèces-âge) plutôt qu'aux arbres individuels. L'utilisateur choisit l'extension de succession pour simuler les processus d'établissement de la cohorte, la croissance, le vieillissement et la sénescence. Selon l'extension, les cohortes sont représentées par la présence-absence ou par une mesure continue de l'abondance (par exemple, la biomasse) pour chaque cohorte. Les cohortes sont discrétisées en classes distinctes qui reflètent généralement l'unité d'intégration temporelle (ie, pas de temps) utilisée pour modéliser la succession (Scheller and Mladenoff, 2004). Des extensions de perturbation optionnelles simulent des processus écologiques destructrices tel que la récolte de bois (Gustafson *et al.*, 2000) utilisé lors de cette étude.

La version de LANDIS-II intégrée dans MOSAICC est liée à sa nouvelle extension PnET-Succession basé sur les processus physiologiques («process-based model»). PnET-Succession intègre des composants de la biomasse forestière spatialement explicite, l'extension Biomasse Succession de LANDIS-II (Scheller and Mladenoff, 2004; Scheller, 2012) et le modèle unidimensionnel d'écophysiologie PnET-II (Aber and Federer, 1992; Aber *et al.*, 1995) dans une extension unique qui simule dynamiquement les processus écophysiologiques les plus importantes qui conditionne la réponse des espèces d'arbres aux facteurs tel que l'ombrage, le climat et la composition chimique de l'atmosphère.

Les données climatiques à basse résolution provenant du portail de réduction statistique d'échelle («Statistical downscaling») de la composante climatique de la plateforme MOSAICC sont une des entrées initiales pour l'ensemble de la structure du modèle. Les autres entrées principale du modèle sont i) les types de peuplements (Initial Communities), ii) les paramètres des espèces et iii) les écorégions représentant des espaces de terrain présentant une homogénéité par rapport à certains facteurs édapho-climatiques et topographiques.

2.2. Présentation de la zone d'étude

Pour pouvoir tester ce modèle et décider quant à son utilisation dans le contexte Marocain, la zone pilote de la Maâmora a été choisie principalement pour la disponibilité de données exigée par le modèle. Des tests de large envergure sur l'ensemble des directions régionales des Eaux et Forêts sont programmés en collaboration avec les services régionaux d'aménagement.

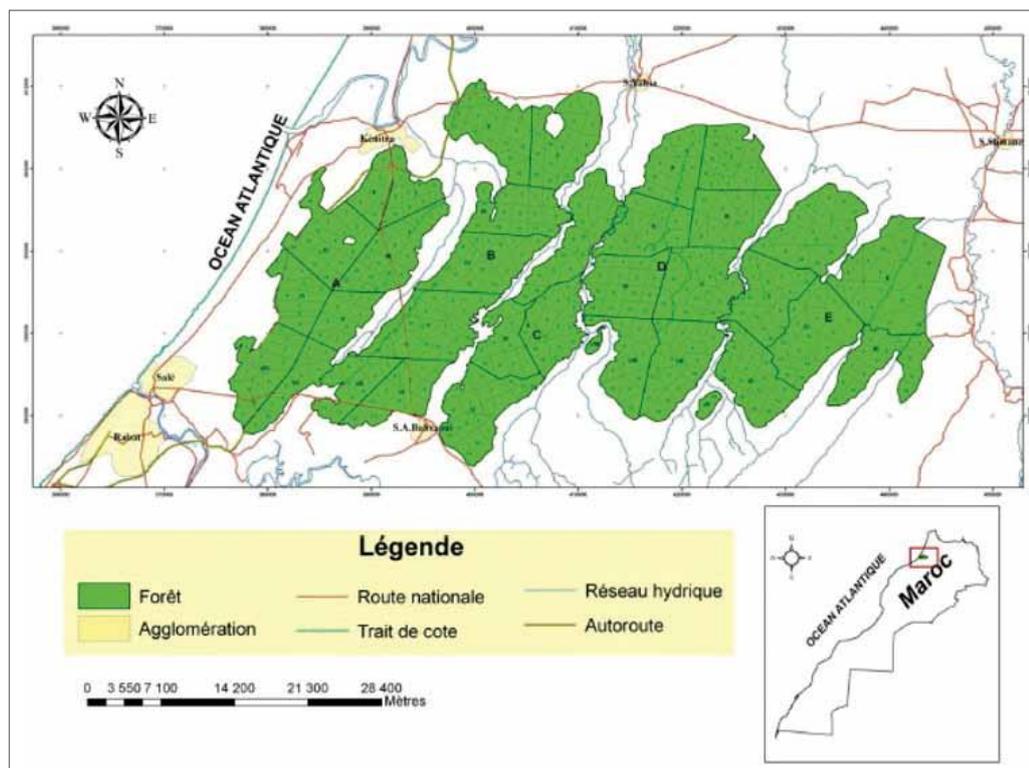
La forêt de la Maâmora est l'une des forêts les plus importantes au Maroc de par son histoire et les biens et services qu'elle produit. Elle sert aux besoins en bois de feu, au parcours du bétail, la récréation, etc. de plus d'une dizaine de communes.

Cette forêt jadis couverte entièrement par le chêne liège jusqu'avant le protectorat français (Mounir, 2002) est présentement à 50% environ convertie en d'autres espèces comme les acacias, les pins, et les eucalyptus principalement.

2.2.1. Situation géographique, administrative et forestière

S'étendant sur 68km (Ouest-Est) et 38km (Nord-Sud) (Mounir, 2002), La forêt de la Maâmora se situe en bordure de l'océan atlantique. Elle est située entre les méridiens 6° et 6° 45' W, et les parallèles 34° et 34° 20' N. La figure ci-après situe globalement la forêt.

Figure 1. Situation générale de la forêt de Maâmora (Bagaram, 2014).



Cette forêt est naturellement subdivisée en cinq parties par des cours d'eau, donnant lieu aux cinq cantons de la forêt nommés de A à E de l'Ouest vers l'Est. Ces cinq cantons sont à leur tour subdivisés en groupes donnant en tout 33 groupes pour toute la forêt. Chaque groupe est aussi subdivisé en parcelles. La forêt comporte au total 448 parcelles.

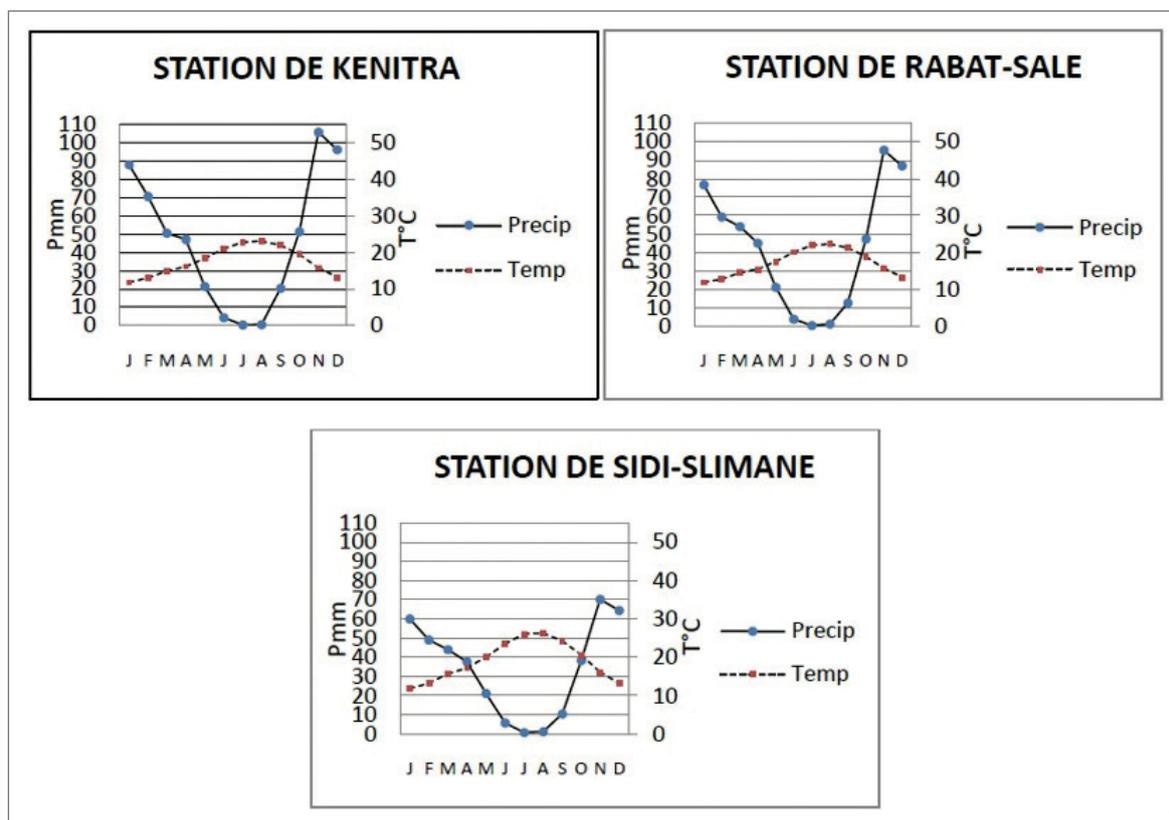
2.2.2. Climat

Le climat de la forêt de Maâmora est de type méditerranéen, avec influence de l'océan atlantique. La température minimum absolue enregistrée jusqu'à ce jour est de -6°C , à Kenitra et le maximum enregistré est de $50,3^{\circ}\text{C}$ à Tiflet. La moyenne des températures minima du mois le plus froid (Janvier) est toujours supérieur à 0°C et varie entre $4,5^{\circ}\text{C}$ (à l'intérieur) et $8,2^{\circ}\text{C}$ (sur la côte). La moyenne des températures maxima du mois le plus chaud (juillet ou août selon la position) va de $27,3$ (sur la côte) à $37,1^{\circ}\text{C}$ (à l'intérieur du continent). Les précipitations visibles sont sous forme de pluie et la fourchette générale des précipitations annuelles en Maâmora va de 350 à 650 mm (Mounir, 2002).

Le bioclimat de la zone d'étude est de type semi-aride à hiver tempéré dans la partie orientale de la forêt et subhumide à hiver chaud dans sa partie occidentale (Aafi, 2007).

La figure ci-après présente les diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen (Bagnouls and Gaussen, 1953) obtenus pour trois stations à partir des données de la DMN sur la période 1980-2013.

Figure 2. Diagrammes ombrothermiques de Bagnouls et Gaussen.



D'après ces graphes, on déduit que la période sèche va de 4,5 à 5 mois pour Kenitra et Rabat-Salé, et elle dépasse les 5 mois (5,5 mois) pour Sidi-Slimane. Ceci confirme encore l'effet de la continentalité mentionné plus tôt en ceci que la période sèche est plus longue à l'intérieur du continent que sur la côte.

2.2.3. Topographie

La topographie de la forêt de Maâmora est très faiblement accidentée. Les pentes sont très faibles en moyenne. La pente, doucement inclinée vers la plaine du Gharb, varie de 0,6 à 0,8 % en moyenne, sauf dans la Maâmora orientale où elle est suffisamment forte pour provoquer une érosion importante (Abourouh *et al.*, 2005).

2.2.4. Pédologie

En Maâmora, les sols sont en général de type sable sur argiles (Lepoutre, 1965 *in* Bagaram, 2014). La nature des sables et leur profondeur ont permis à Lepoutre de distinguer plusieurs types de sols tels que les sables beiges peu profonds sur argile, fréquents dans le sud des cantons C, D et E; les sables profonds sur argile, présents sur tous les comblements des creux de la surface des argiles et dans la zone d'épandage au Nord des cantons C, D et E; les sables rouges sur argile qui caractérisent les reliefs dunaires; les sols hydromorphes, présents soit dans des terrains subhorizontaux (nord du canton D) où le drainage latéral est faible, soit dans des bas-fonds.

De manière générale en Maâmora, le type de sol est déterminant en matière de rétention en eau. En effet, selon l'épaisseur des sables, l'eau peut devenir indisponible à l'utilisation des plantes. Avec les changements climatiques, ce facteur (type de sol) peut devenir de plus en plus limitant étant donné que déjà, la réserve d'eau utilisable par les plantes est faible et elle diminuera si les précipitations diminuent.

2.2.5. Végétation forestière

La forêt de Maâmora qui était à l'origine une subéraie a fait place pour une bonne part à des reboisements divers. Actuellement, la végétation forestière arborée de cette forêt est représentée par les espèces comme *Quercus suber* et *Pyrus mamorensis* (Seules espèces arborées naturelles); les eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* pour la production de la cellulose, *Eucalyptus gomphocephala* pour la production de bois de scie, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus cladocalyx*, *Eucalyptus sideroxylon* et *Eucalyptus clonal*); les pins (*Pinus pinaster*, *Pinus Canariensis*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinea*); les acacias (*Acacia mollissima* principalement pour la production du tanin, mais aussi *Acacia cyclops* pour l'alimentation du cheptel et *Acacia horrida* pour la construction de haies) (Mounir, 2002).

La végétation arbustive quant à elle est représentée par les espèces comme *Citrus linifolia*, *Chamerops humilis*, *Thymelaea lythroides*, *Daphne gnidium* et *Solanum sodomium* (Mounir, 2002).

Toute forêt naturelle quand elle est dégradée ou remplacée par d'autres espèces devient plus vulnérable. En effet, la capacité d'adaptation de l'espèce naturelle est souvent plus importante que celle des espèces reboisées. Aussi, les changements climatiques accentueront la vulnérabilité des écosystèmes forestiers non naturels.

2.2.6. Activités anthropiques

Depuis plusieurs décennies, de nombreuses contraintes anthropiques pèsent sur le système de gestion de la forêt de Maâmora, ayant ainsi de nombreuses répercussions néfastes sur la régénération naturelle du chêne liège et conséquemment sur la dynamique et la santé de son écosystème. En 1993, La population riveraine de la forêt était d'environ 300000 habitants, soit 4,5 habitants par ha de subéraie; l'effectif du cheptel s'élevait à 173000 têtes ovines et 52000 têtes bovines faisant une charge animale de 6,4 UPB/ha (Abourouh *et al.*, 2005). La charge pastorale est assez importante vu que la forêt ne produit que 400 UF/ha au mieux. Cette charge a augmenté avec

le temps et les besoins ont suivi. Dernièrement, les statistiques du HCEFLCD (2012) donnent une population de 341360 habitants soit 5 habitants par ha de subéraie, 336518 têtes ovines et 90553 unités bovines, soit 7,1 UPB/ha.

2.2.7. Gestion forestière

La forêt de Maâmora a connu un plan de sauvetage et divers aménagements qui se sont succédés depuis le début du XXème siècle (HCEFLCD, 2012). Après quelques échecs de maintien du chêne liège, l'aménagement Danois (1972-1992) s'est fixé des objectifs de maintien du chêne liège là où il était vigoureux et le remplacement par d'autres espèces plus rentable comme l'acacia, le pin ou l'eucalyptus là où sa reconstitution est difficile.

Inspiré de l'expérience de la péninsule Ibérique en matière de gestion agro-sylvo-pastorale de la subéraie, l'aménagement sylvo-pastoral qui a suivi (FAO 1993-2012) s'est fixé pour objectifs entre autres la régénération et la reconstitution des peuplements de chêne liège par le biais des reboisements artificiels de chêne liège (semis directs des glands et plantations). Cet aménagement a plus ou moins porté ses fruits en ceci que les superficies régénérées en chêne liège ont grimpé.

L'aménagement en cours (2014-2024) fixe aussi comme objectif important la reconstitution des peuplements de chêne liège, en plus d'autres objectifs. Il s'agit d'objectifs simples et réalisables qui pourront permettre, si bien atteints, de redynamiser la forêt de Maâmora. C'est cet aménagement forestier qui est utilisé lors de la simulation avec la perturbation harvest.

Retenons de tous ces aménagements qu'a connus la forêt de Maâmora, qu'ils étaient inadaptés car les gestionnaires avaient du mal à reconstruire la subéraie. Mais au fil du temps, ils se rendent compte que même si les conditions de station sont difficiles, des techniques de régénération comme la régénération par semis de glands donnent des résultats acceptables et pourront être pour l'instant le meilleur moyen de régénérer la subéraie.

2.3. Les données climatiques

Les données climatiques utilisées par le modèle forestier proviennent de la composante climatique de la plateforme via réduction d'échelle («Statistical downscaling»), préparées par les climatologues du DMN. Trois modèles ont été retenus pour le Maroc, CANESM2 (Canada), MIROC-ESM (Japon), et MPI-ESM MR (Allemagne). Deux scénarios climatiques (IPCC, 2013) sont disponibles sur la plateforme, RCP 4.5 (optimiste), et RCP 8.5 (pessimiste).

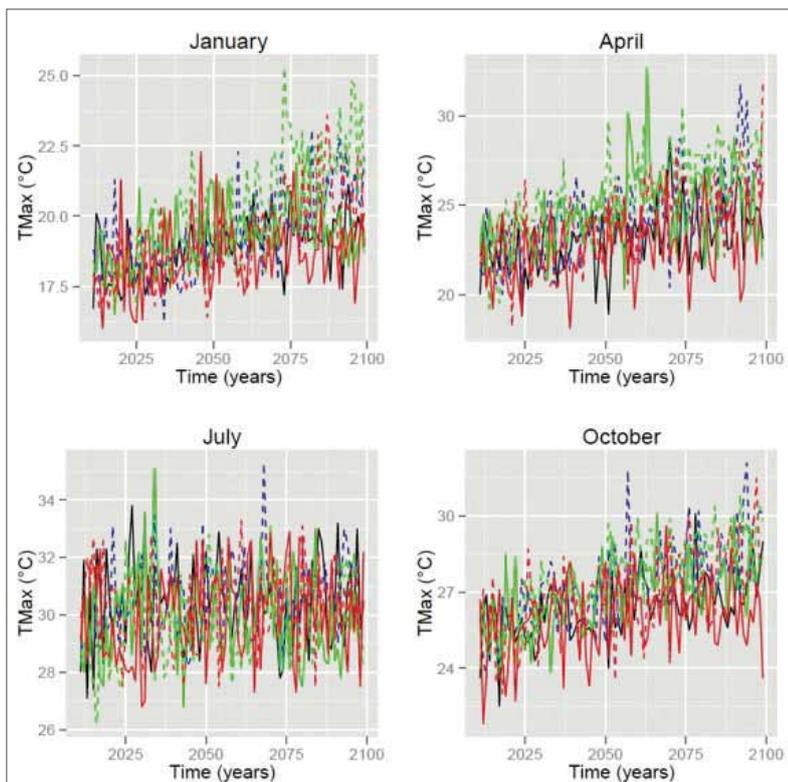
Un scénario de référence est aussi disponible afin de comparer les résultats des simulations des deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 avec les résultats sans changement de climat. Le scénario de référence est une moyenne du climat de 1971-2000.

Le modèle utilise des données mensuelles de cinq variables: la température maximale (TMax), la température minimale (TMin), les précipitations, le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), et la concentration en CO₂ dans l'atmosphère.

Les valeurs de la température maximale, de la température minimale et des précipitations proviennent de la composante climatique de MOSAICC. Les valeurs du PAR sont calculées dans la plateforme MOSAICC en fonction de plusieurs variables dont TMax et TMin. Les valeurs de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère proviennent des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.

Ci-dessous, une représentation graphique des températures maximales pour les trois modèles et les deux scénarios pour les mois de janvier, avril, juillet et octobre de 2011 à 2099.

Figure 3. Température maximale future dans la Maâmora selon les différents modèles et scénarios.

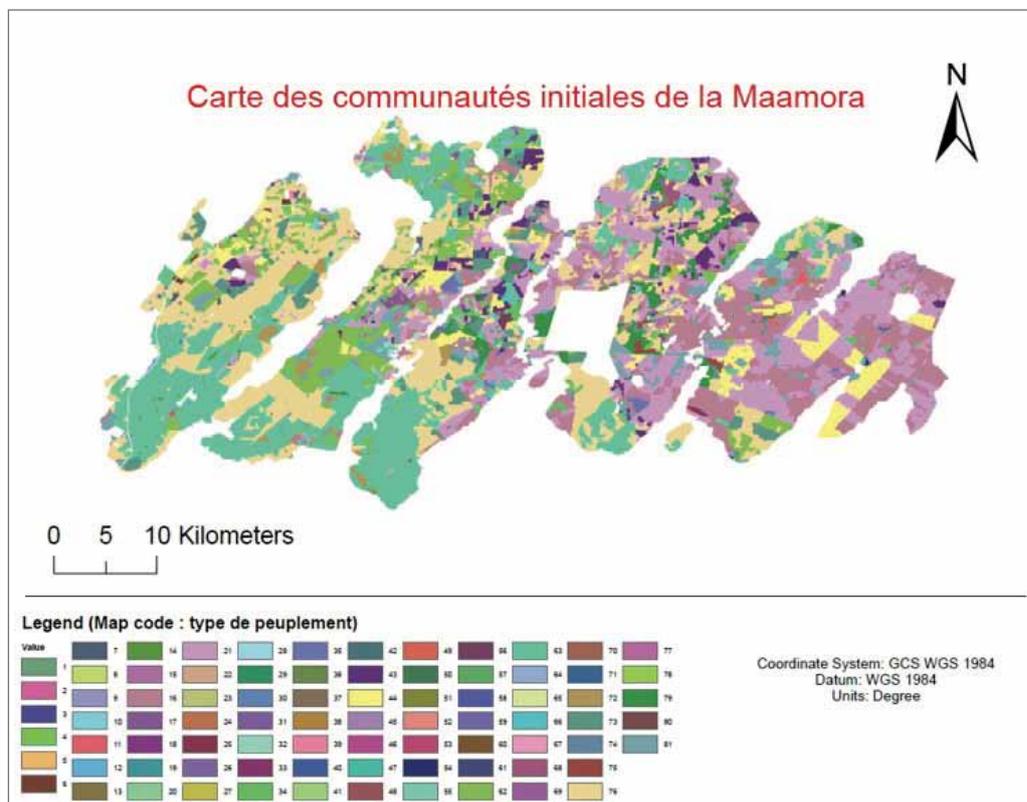


Courbe bleue pleine: *Modèle CANESM2 et scénario RCP4.5*;
Courbe bleue pointillée: *Modèle CANESM2 et scénario RCP8.5*;
Courbe verte pleine: *Modèle MIROC-ESM et scénario RCP4.5*;
Courbe verte pointillée: *Modèle MIROC-ESM et scénario RCP8.5*;
Courbe rouge pleine: *Modèle MPI-ESM MR et scénario RCP4.5*;
Courbe rouge pointillée: *Modèle MPI-ESM MR et scénario RCP8.5*.

2.4. La carte des communautés initiales

La carte des communautés initiales a été préparée sur base de la couche des types de peuplements élaborée lors de la révision de l'aménagement sylvopastoral de la forêt de la Maâmora pour la période 1992-2012. La figure suivante représente la carte des communautés initiales.

Figure 4. Carte des communautés initiales de la forêt de la Maâmora.



2.5. Les paramètres des espèces

La modélisation basée sur les processus peut être définie comme une procédure par laquelle le comportement d'un système est dérivé d'un ensemble de composants fonctionnels et leurs interactions entre eux et l'environnement du système, grâce à des processus physiques et mécaniques qui se produisent au fil du temps (Godfrey, 1983; Bossel, 1994). Pour décrire chacun des composants fonctionnels, une série de variables ou de paramètres est nécessaire. Cependant, dans la plus part des cas, les valeurs de ces paramètres sont inconnues ou difficiles à mesurer.

Pour la zone pilote de la Maâmora, une recherche bibliographique (Reich *et al.*, 2009; Kattge *et al.*, 2009; Kerkhoff *et al.*, 2006; Blonder *et al.*, 2011; Price *et al.*, 2007; Paula *et al.*, 2009; Ogaya and Penuelas, 2003; Milla and Reich, 2011; Wirth and Lichstein, 2009) complétée par des interviews avec des experts en écologies des écosystèmes marocains nous ont permis d'identifier les valeurs pour certains paramètres des espèces de la Maâmora et qui sont nécessaires pour l'utilisation du modèle. Le tableau suivant résume les valeurs des variables en question pour chacune des espèces.

Tableau 1 Liste des espèces de la forêt de la Miámora et leurs paramètres.

Liste des codes	Espèce supposée	Longévité en année	Maturité sexuelle	Type de feuilles	Héliophile (/5)	Tolérance au feu (/5)	Tolérance à la sécheresse (/4)	Distance de dispersion effective (m)	Distance de dispersion maximale (m)	Probabilité de végétation	Age min pour rejeter	Age max pour rejeter
acacycl	<i>Acacia cyclops</i>	30	5	Feuille sempervirent	5	3	4	20	100	0.95	1	12
acacmall	<i>Acacia mollissima</i>	40	5	Feuille sempervirent	5	2	3	20	100	0.95	1	20
casucunn	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	40	10	Autre	5	2	2	50	100	0.95	1	40
eucacama	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	120	5	Feuille sempervirent	5	1	3	50	100	0.95	1	120
eucacdad	<i>Eucalyptus cladocalyx</i>	120	5	Feuille sempervirent	5	1	3	50	100	0.95	1	120
eucacdon	<i>Eucalyptus clonal</i>	40	5	Feuille sempervirent	5	1	3	50	100	0.95	1	40
eucagomp	<i>Eucalyptus gomphocephala</i>	120	5	Feuille sempervirent	5	1	4	50	100	0.95	1	120
eucagran	<i>Eucalyptus grandis</i>	120	5	Feuille sempervirent	5	1	2	50	100	0.95	1	120
eucaside	<i>Eucalyptus sideroxylon</i>	120	5	Feuille sempervirent	5	1	4	50	100	0.95	1	120
pinucana	<i>Pinus canariensis</i>	40	9	Pin	5	1	2	50	100	0.95	1	40
pinuhale	<i>Pinus halepensis</i>	40	10	Pin	5	1	3	5	28	0	0	0
pinupina	<i>Pinus pinaster</i>	40	9	Pin	5	1	3	10	100	0	0	0
pinupine	<i>Pinus pinea</i>	40	9	Pin	5	1	3	10	100	0	0	0
pinuradi	<i>Pinus radiata</i>	40	9	Pin	5	1	1	10	100	0	0	0
pyrumamo	<i>Pyrus communis</i> var. <i>mamarensis</i>	120	10	Feuille sempervirent	3	1	3	5	10	0.95	1	120
quersube	<i>Quercus suber</i>	120	15	Feuille sempervirent	4	1	3	5	10	0.95	1	120

2.6. La calibration des espèces

Le calibrage d'un modèle consiste à ajuster les valeurs des paramètres pour que les données simulées correspondent aux valeurs expérimentales obtenues au champ ou au laboratoire (Dzotsi, 2002).

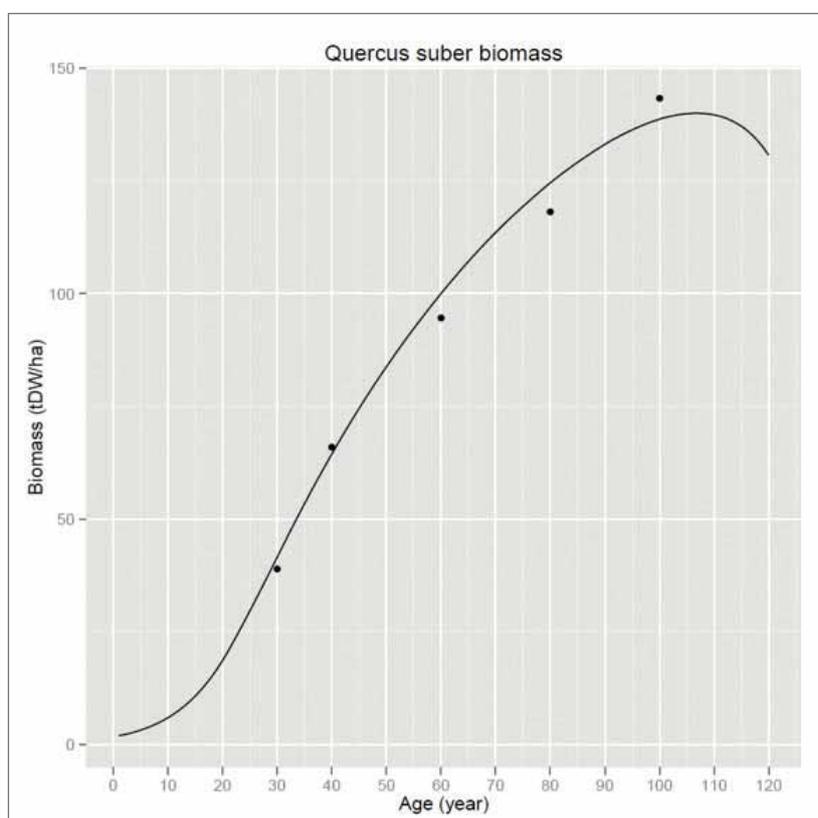
Selon Bazi et al, (1995), c'est un processus d'ajustement dans lequel quelques aspects non conformes du modèle sont «retouchés» en optimisant la valeur de quelques paramètres, en vue de les adapter aux observations réelles.

La calibration dans MOSAICC permet de calibrer une espèce en faisant plusieurs itérations avec différentes valeurs de paramètres en une seule simulation.

Trois paramètres du Tableau 1, *Type de feuilles*, *Tolérance à la sécheresse* et *Héliophile* regroupent plusieurs valeurs de sous-paramètres dans MOSAICC afin de faciliter l'utilisation du modèle. Ces sous-paramètres sont modifiables par l'utilisateur de la plateforme et certains d'entre eux servent lors de la calibration.

Des tables de production de la Maâmora étaient disponibles pour certaines espèces (*Eucalyptus sideroxylon*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Quercus suber*, *Pinus pinaster*). Pour les autres, des données de la biomasse proviennent de la littérature (Sghaier and Ammari, 2012; Maseyk *et al.*, 2008; FAO, 1982; Theron *et al.*, 2004; Wieser *et al.*, 2002; Correia *et al.*, 2010). Ci-dessous un exemple de calibration avec le *Quercus suber*.

Figure 5. Calibration du *Quercus suber* dans la forêt de la Maâmora. Les points représentent les données réelles de biomasse que l'on rencontre dans la Maâmora pour des sols sableux et profonds (croissance optimale). La courbe représente l'évolution de la biomasse dans le temps avec le modèle LANDIS-II après calibrage dans la plateforme MOSAICC.



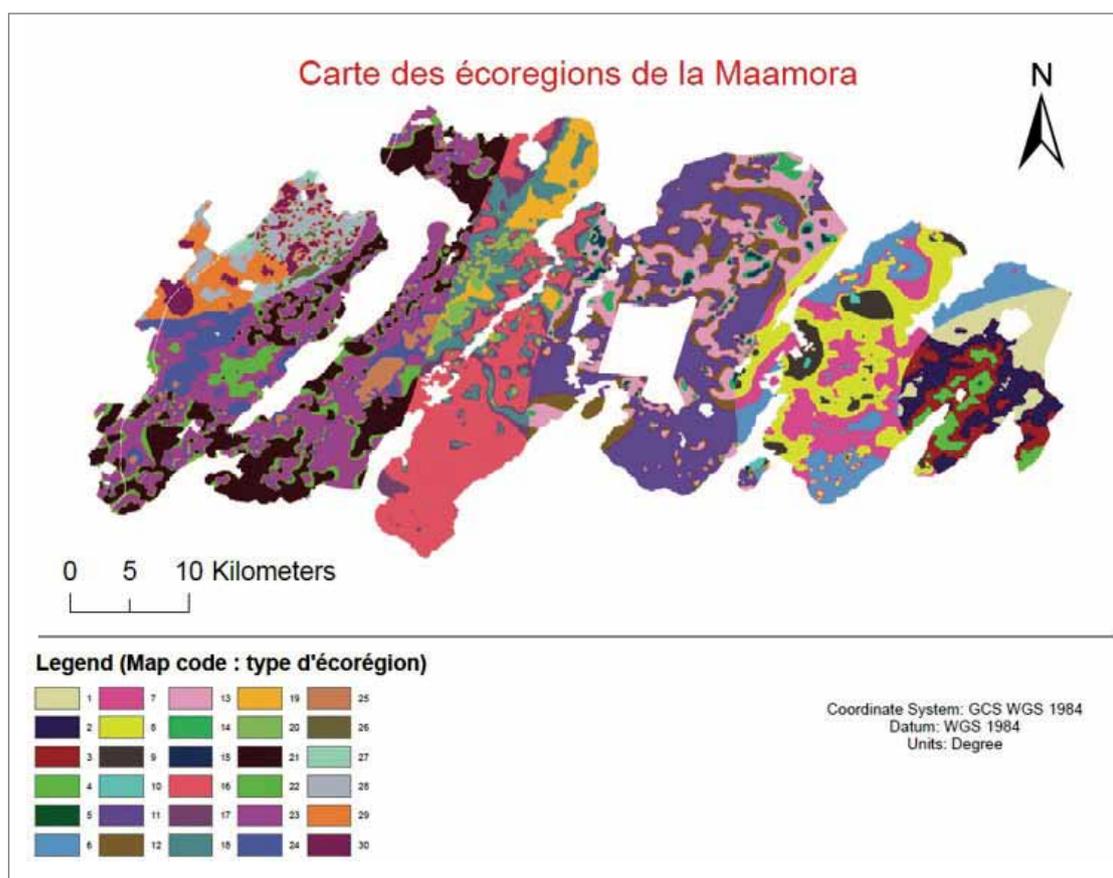
2.7. Les écorégions

Une écorégion ou région écologique est une zone géographique d'une certaine entendue se distinguant par le caractère unique de sa géomorphologie, de sa géologie, de son climat, de ses sols, de ses ressources en eau, de sa faune et de sa flore. Le modèle LANDIS-II simule de développement des cohortes par référence aux écorégions de la zone d'étude. Les écorégion peuvent être élaborées sur la base d'un certain nombre de facteurs qui peuvent être différents d'une zone à l'autre.

Dans le contexte de la forêt de la Maâmora, les facteurs qui ont été pris en considération pour l'élaboration de la carte des écorégions sont la profondeur de la couche d'argile, la pente de la couche d'argile et la couche des isoètes de précipitation ou couche de continentalité.

Ces facteurs ont été pris en considération suite à une analyse détaillée de la littérature scientifique relative à la forêt de la Maâmora et qui présente ces derniers comme étant les plus importants pour le développement des espèces forestière dans cet espace. La figure suivante reprend la carte des écorégions de la forêt de la Maâmora.

Figure 6. Carte des écorégions de la Maâmora



2.8. Données complémentaires avec gestion forestière

Dans le cas de la forêt de la Maâmora, les feux de forêt sont très rares et les chablis sont presque inexistant, c'est la raison pour laquelle la seule extension qui a été testée est celle relative aux prescriptions de la gestion forestière (Harvest). Les données nécessaires pour cette extension, en plus des données de base déjà exposés, sont la carte des parcelles et la carte des peuplements par parcelle (management map, stand map) ainsi que les interventions forestières prévues dans le temps.

Les interventions forestières sont effectuées pour chaque espèce individuellement. Les eucalyptus sont traités en taillis avec dépressage, les pins et les acacias en futaie avec plantation après la coupe finale, avec des éclaircies et des élagages prévus pour les pins. *Quercus suber* subit un élagage et plusieurs éclaircies avant le recépage final (50% des peuplements entre 75 et 100 ans) ou la coupe finale et la plantation (entre 100 et 120 ans). Les espèces *Pinus radiata*, *Pyrus communis* var. *mamorensis*, et *Casuarina cunninghamiana* ne subissent aucune intervention.

Nous avons introduit, via l'extension de perturbation harvest, seulement 15% de réussite de régénération du *Quercus suber* afin de traduire la pression existante sur le chêne liège durant le stade de régénération naturelle dans la Maâmora (ramassage des glands doux, parcours, ...).

3. Résultats

3.1. Résultats du test du modèle sans perturbation

Six simulations ont été réalisées afin de couvrir les différents scénarios et afin d'utiliser les trois modèles climatiques retenus pour le Maroc. Le tableau ci-dessous reprend les six combinaisons:

Tableau 3 Simulations effectuées sans extension de perturbation pour les différents scénarios et modèles.

Modèles/Scénarios	RCP 4.5	RCP 8.5
CANESM2	✓	✓
MIROC-ESM	✓	✓
MPI-ESM MR	✓	✓

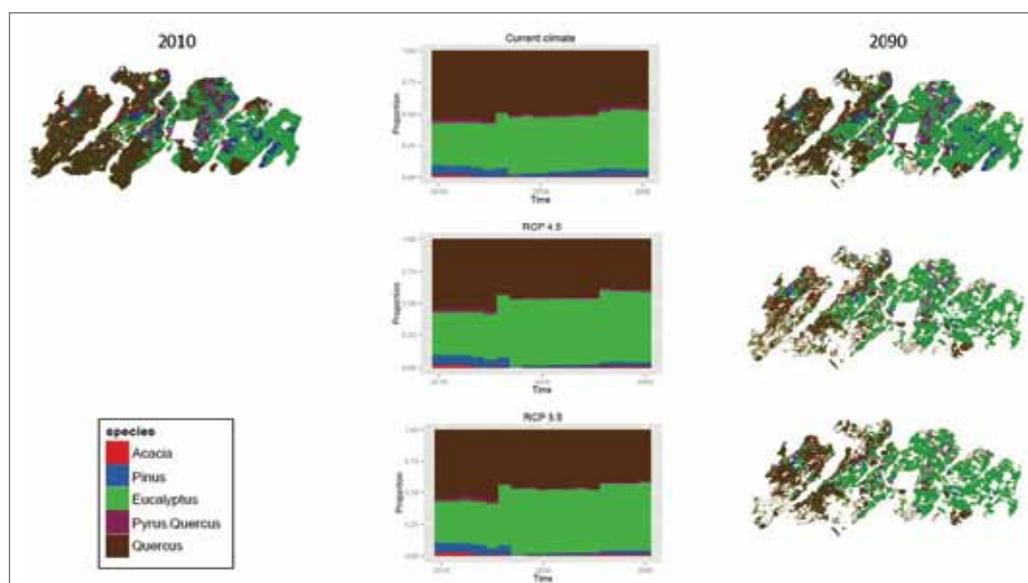
En plus de ces six combinaisons, une simulation avec des données climatiques dites de Référence (1971-2000) a été réalisée afin de comparer les résultats et évaluer l'impact du changement climatique sur la forêt de la Mâamora.

Deux dates ont été sélectionnées à des fins de comparaison pour les analyses statistiques: 2050 ou futur proche et 2090 ou futur lointain.

3.1.1. Distribution

Les résultats de la distribution d'une espèce sous format cartographique permet de visualiser où l'espèce est la plus présente spatialement. La visualisation cartographique permet également de distinguer les sites où l'espèce aura le plus de probabilité de s'installer naturellement suivant le scénario climatique.

Figure 7. Comparaison de la distribution des espèces dans la forêt de la Maâmora en 2090 sans perturbation (Modèle CANESM2).

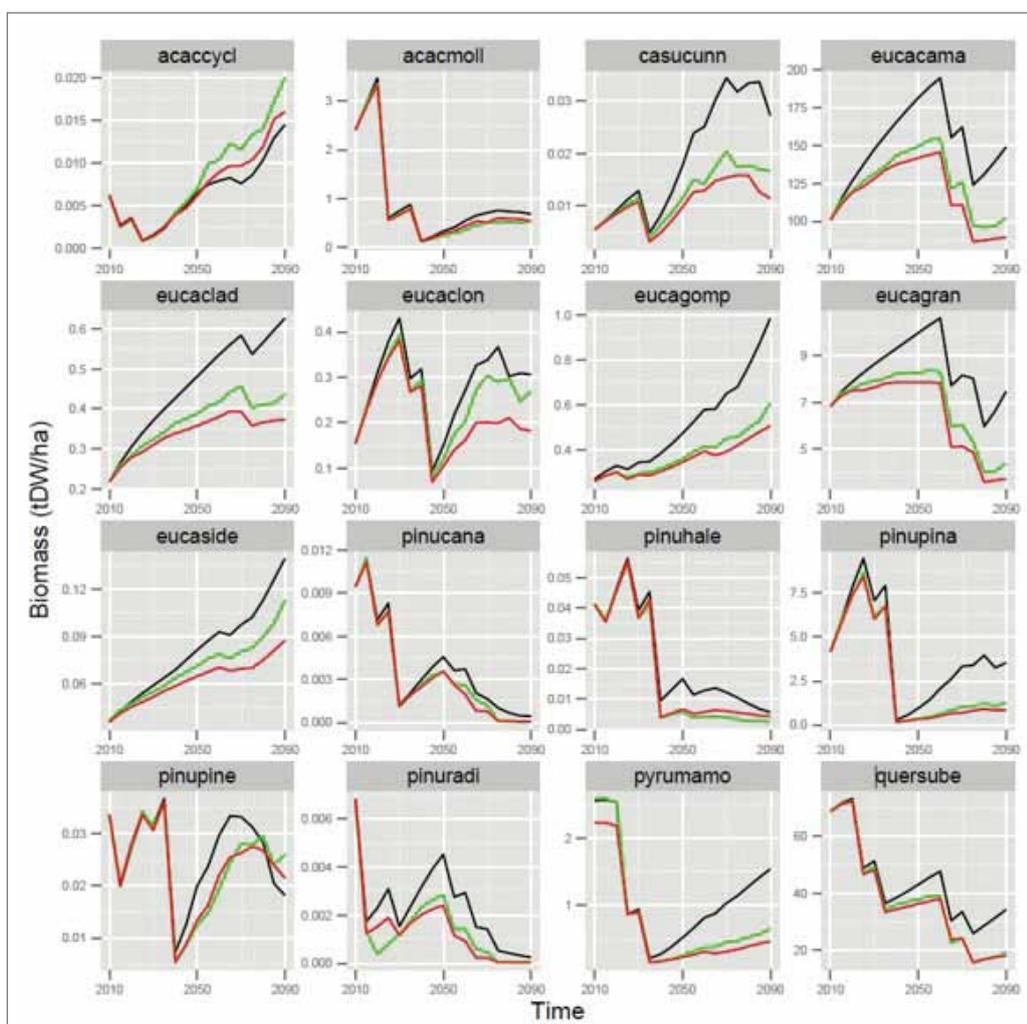


On peut remarquer, dans ces cartes, la diminution dans le temps du nombre de sites où l'on retrouve le *Quercus suber*. Cette diminution est plus marquée pour le scénario pessimiste (RCP 8.5) que pour le scénario optimiste (RCP 4.5). Il y a une préférence marquée pour les sites les plus à l'ouest de la forêt en ce qui concerne la régénération naturelle de l'espèce. Les eucalyptus sont les seuls à voir leur proportion de distribution augmenter. En règle générale, il y a une diminution de la surface forestière sans intervention.

3.1.2. Biomasse

En agrégeant dans un graphique de l'évolution de la biomasse totale moyenne pour les trois scénarios (Référence, RCP 4.5 et RCP 8.5) nous pouvons avoir un aperçu de l'impact du changement climatique sur chaque espèce. La figure 8 représente biomasse totale moyenne pour le modèle CANESM2.

Figure 8. Biomasse totale en tonnes de matière sèche à l'hectare pour chaque espèce sans perturbation dans la forêt de la Maâmora (Modèle CANESM2). Courbe noire: Scénario de Référence; Courbe verte: Scénario RCP 4.5; Courbe rouge: Scénario RCP 8.5.



Pour les trois modèles, la plupart des espèces subissent un impact négatif du changement climatique. Mis à part *Pinus pinea* à l'horizon 2090 et *Acacia cyclops* à partir de l'horizon 2050, la courbe du scénario RCP 8.5 (rouge) se trouve en dessous de la courbe de référence, indiquant que la biomasse totale de ces espèces est moins importante que sous le climat de référence. Pour

Eucalyptus clonal, et *Pinus canariensis*, le scénario climatique optimiste (RCP 4.5) semble ne pas trop les affecter.

Les résultats de chaque simulation, regroupés par modèle pour les trois scénarios, ont subi une analyse statistique complète. Nous nous sommes focalisés sur les deux essences les plus représentées dans la Maâmora: *Eucalyptus camaldulensis* et *Quercus suber*.

Tableau 4 Récapitulatif des résultats des analyses statistiques des trois scénarios climatiques (Référence, RCP 4.5 et RCP 8.5) pour les trois modèles climatiques.

	Scénario	Espèce	MPI-ESM MR	CANESM2	MIROC-ESM
2010	RCP 4.5	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	NS	NS	NS
		<i>Quercus suber</i>	NS	NS	NS
	RCP 8.5	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	NS	NS	NS
		<i>Quercus suber</i>	NS	NS	NS
2050	RCP 4.5	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	NS	NS	NS
		<i>Quercus suber</i>	NS	NS	NS
	RCP 8.5	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	NS	NS	NS
		<i>Quercus suber</i>	NS	NS	NS
2090	RCP 4.5	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	NS	NS	NS
		<i>Quercus suber</i>	NS	S	HS
	RCP 8.5	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	NS	S	HS
		<i>Quercus suber</i>	NS	S	HS

NS: Non-significatif ($p > 0.05$); S: Significatif ($p < 0.05$); HS: hautement significatif ($p < 0.01$)

Les analyses de variance à un seul critère de classification, dont le critère pris en considération est celui des scénarios pour chacun des trois modèles climatiques, laisse voir qu'il n'y a pas de différence entre les trois modèles pour les deux espèces les plus prépondérantes en Maâmora, *Eucalyptus* et chêne liège, pour l'année de référence 2010. Ce qui est normal puisque les trois modèles donnent les mêmes niveaux de production car ils se basent sur les données historiques.

Le modèle CANESM2 montre que pour l'eucalyptus, le scénario RCP 8.5 présente une différence significative avec le scénario de référence. L'analyse laisse également voir une différence significative entre les deux scénarios projetés et le scénario de référence à l'horizon 2090 pour le chêne liège.

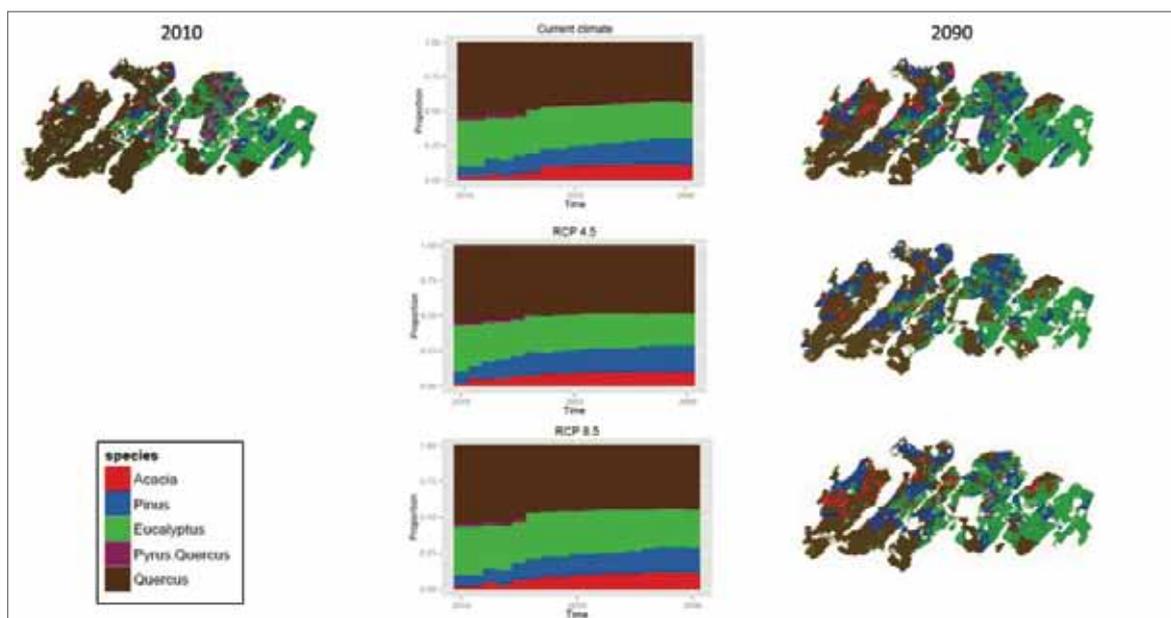
Le modèle MIROC-ESM montre que pour l'*Eucalyptus camaldulensis*, le scénario RCP 4.5 ne présente pas de différence significative avec le scénario de référence. Tandis que le scénario RCP 8.5 présente une différence hautement significative avec le scénario de référence à l'horizon 2090. Pour le chêne liège, les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 présentent des différences hautement significatives avec le scénario de référence à l'horizon 2090.

Le modèle MPI-ESM MR ne met pas en évidence de différence entre les trois scénarios pour les espèces considérées et pour tous les horizons de projection.

3.2. Résultats du test du modèle avec gestion forestière appliquée

Comme pour les simulations sans perturbation, six simulations ont été réalisées avec l'extension de perturbation harvest afin de couvrir les différents scénarios climatiques et afin d'utiliser les trois modèles climatiques retenus pour le Maroc (voir tableau 2).

Figure 9. Comparaison de la distribution des espèces dans la forêt de la Maâmora en 2090 avec gestion forestière (Modèle CANESM2).



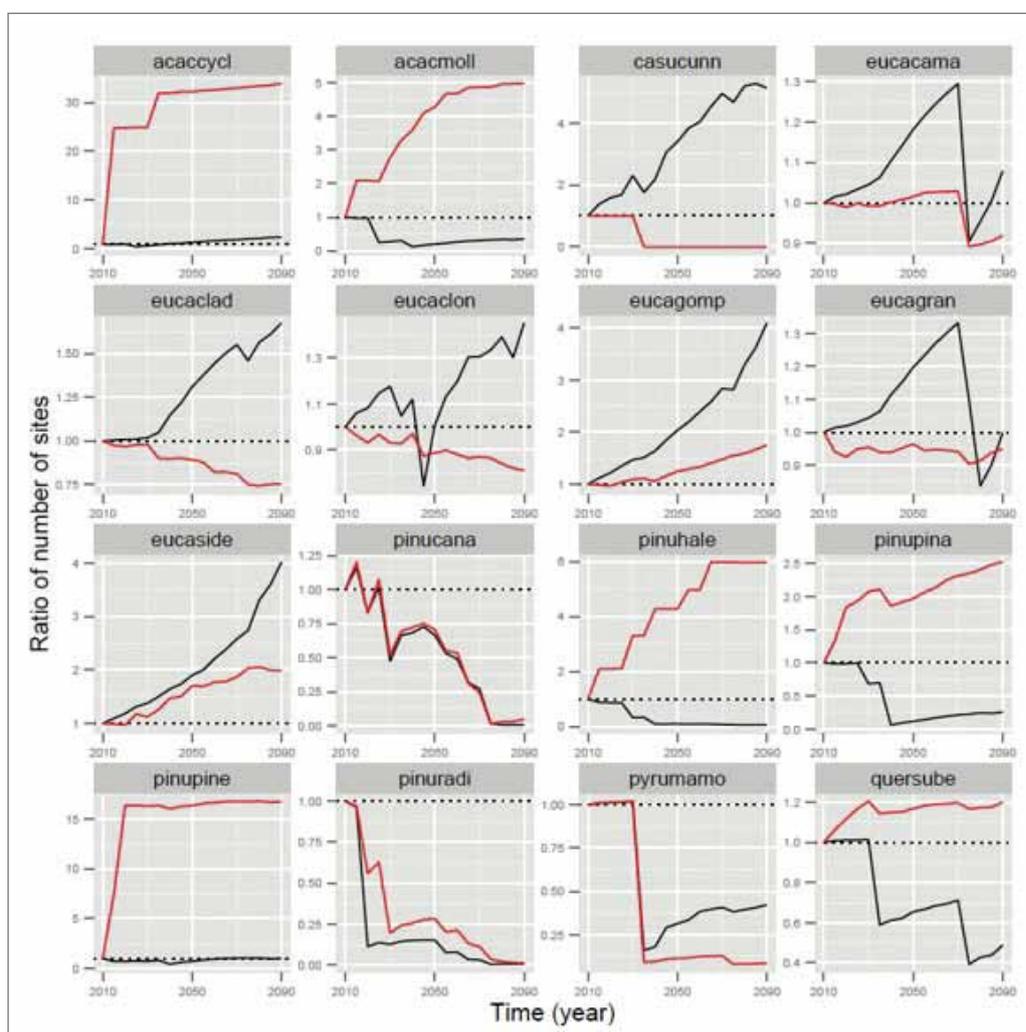
La simulation avec une gestion forestière appliquée a pour effet, ici, de soutenir la surface où l'on retrouve le *Quercus suber*. Avec la régénération artificielle par plantation dans les parcelles où le chêne liège devient trop vieux (100-120 ans), la proportion de distribution diminue très légèrement par rapport aux autres espèces les premières années jusqu'à atteindre un niveau à peu près stable dans le temps, à l'horizon 2035. La proportion de distribution des eucalyptus est stable pour les trois scénarios. On remarque une augmentation plus marquée de la proportion des pins et des acacias à l'horizon 2090 par rapport à 2010.

3.3. Comparaison des simulations avec et sans gestion forestière

3.3.1. Distribution

Une différence du nombre de sites pour chaque espèce est comparable pour les simulations avec et sans gestion forestière (fig. 10). Lorsque la courbe se trouve en dessous de la ligne hachurée (repère de l'année 2010), cela se traduit par une diminution du nombre de sites où l'espèce se retrouve par rapport à l'année 2010.

Figure 10. Comparaison du ratio du nombre de sites où chaque espèce est présente avec (courbe rouge) et sans (courbe bleue) gestion forestière en fonction du nombre de sites où chaque espèce est présente en 2010 (Modèle CANESM2 et scénario RCP 4.5).



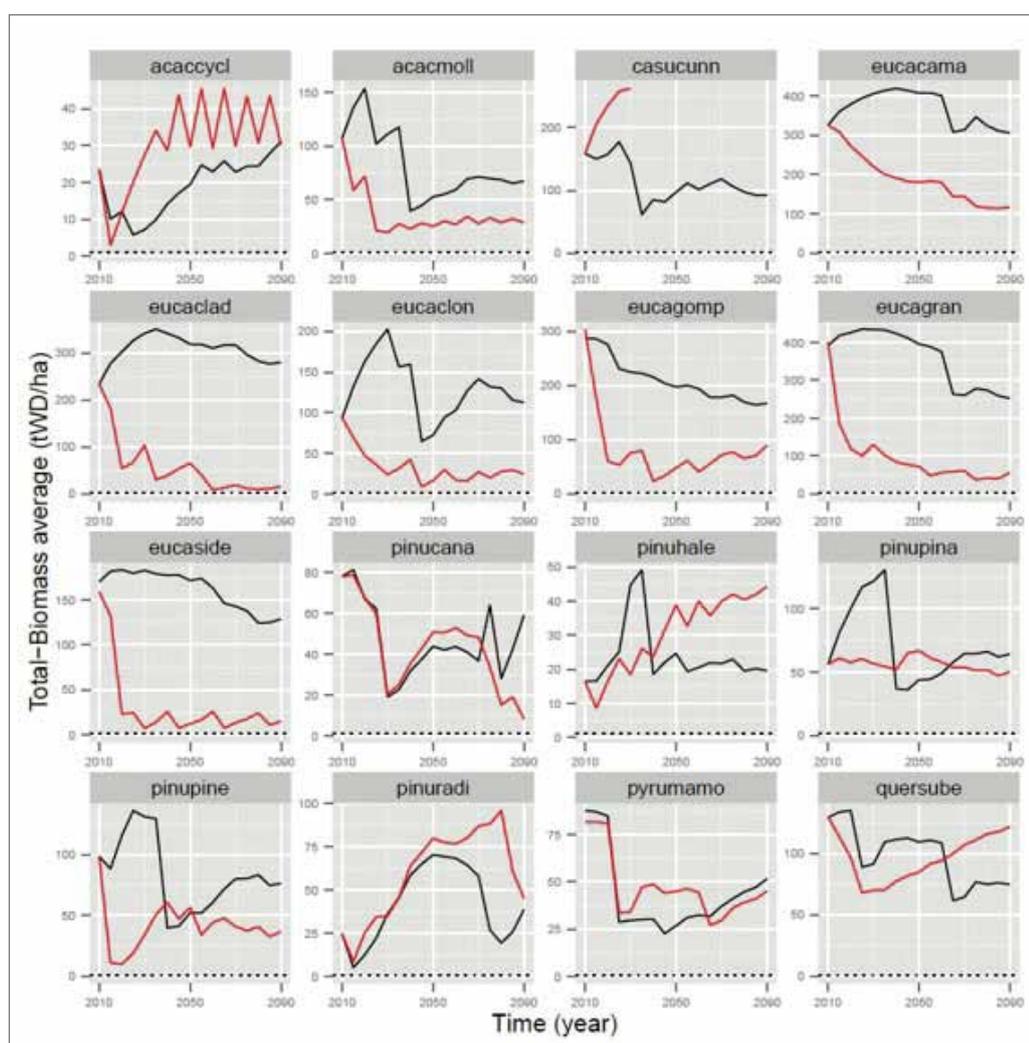
Sans perturbation, il existe une diminution du nombre de sites pour la plupart des pins et une augmentation ou une situation stable pour les eucalyptus. Comme visualisé sur les cartes, nous pouvons remarquer également une diminution du nombre de sites colonisés dans le temps pour *Quercus suber*.

Avec la gestion forestière appliquée, on peut observer une augmentation importante du nombre de sites où l'on retrouve *Acacia cyclops* par rapport à la situation en 2010. La distribution des

eucalyptus reste assez stable dans l'ensemble avec une augmentation plus importante des sites où l'on retrouve *Eucalyptus sideroxylo* et *Eucalyptus gomphocephala* dû à une régénération naturelle en plus du taillis. Le nombre de sites pour *Quercus suber* augmente légèrement. Suivant cette figure, les espèces sans gestion forestière sont vouées à voir leur surface diminuer fortement voir disparaître de la forêt de la Maâmora avant 2090 (*Casuarina cunningamiana*). La surface où l'on retrouve *Pyrus mamorensis* et *Pinus radiata* et *Pinus Canariensis* diminue considérablement par rapport à 2010, sans pour autant disparaître en 2090.

3.3.2 Biomasse

Figure 11. Comparaison de l'évolution dans le temps de la biomasse totale moyenne de chaque espèce avec (courbe rouge) et sans (courbe bleue) gestion forestière dans la forêt de la Maâmora en tonnes de matière sèche par hectare (Modèle CANESM2 et scénario RCP 4.5).



Sans gestion forestière appliquée, la simulation avec le modèle canadien et le scénario climatique optimiste montre que plupart des espèces présentent une diminution de la biomasse totale moyenne en 2090 par rapport à 2010. Certaines espèces comme *Acacia cyclops* et *Eucalyptus cladocalyx* présentent une augmentation de cette biomasse.

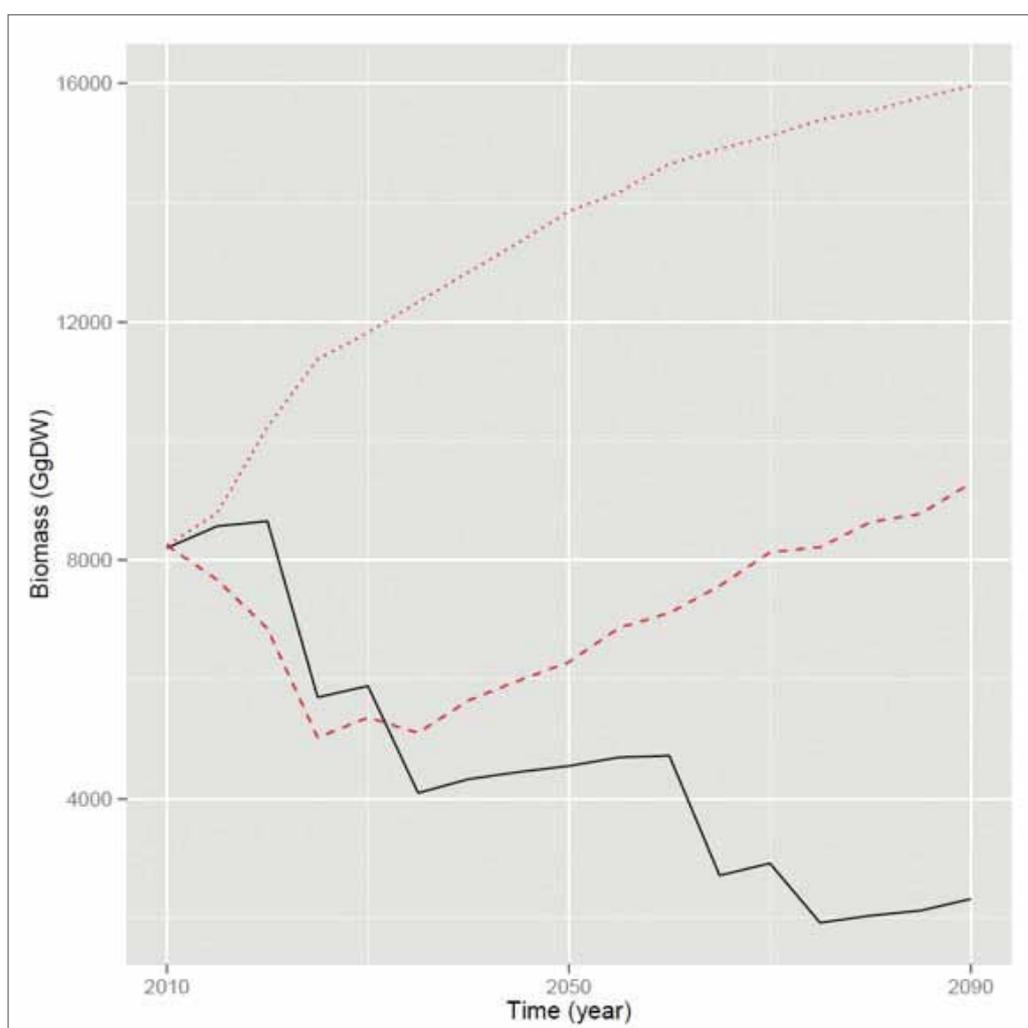
Avec la gestion forestière appliquée, pour *Quercus suber* (en bas à droite), on peut distinguer une diminution de la biomasse totale moyenne sur les sites en 2050 par rapport en 2010 et une augmentation en 2090. La diminution des eucalyptus au début de la simulation est due à des coupes

dans les peuplements plus âgés afin de les transformer en taillis comme suggéré dans la gestion forestière de la Maâmora. On voit en effet que la courbe se stabilise vers 2070.

3.3.3 Le cas du *Quercus suber*

Faire une comparaison de la biomasse totale de *Quercus suber* entre les résultats des simulations avec et sans interventions forestières (fig. 12) permet de distinguer l'importance de ces interventions sur le couvert forestier.

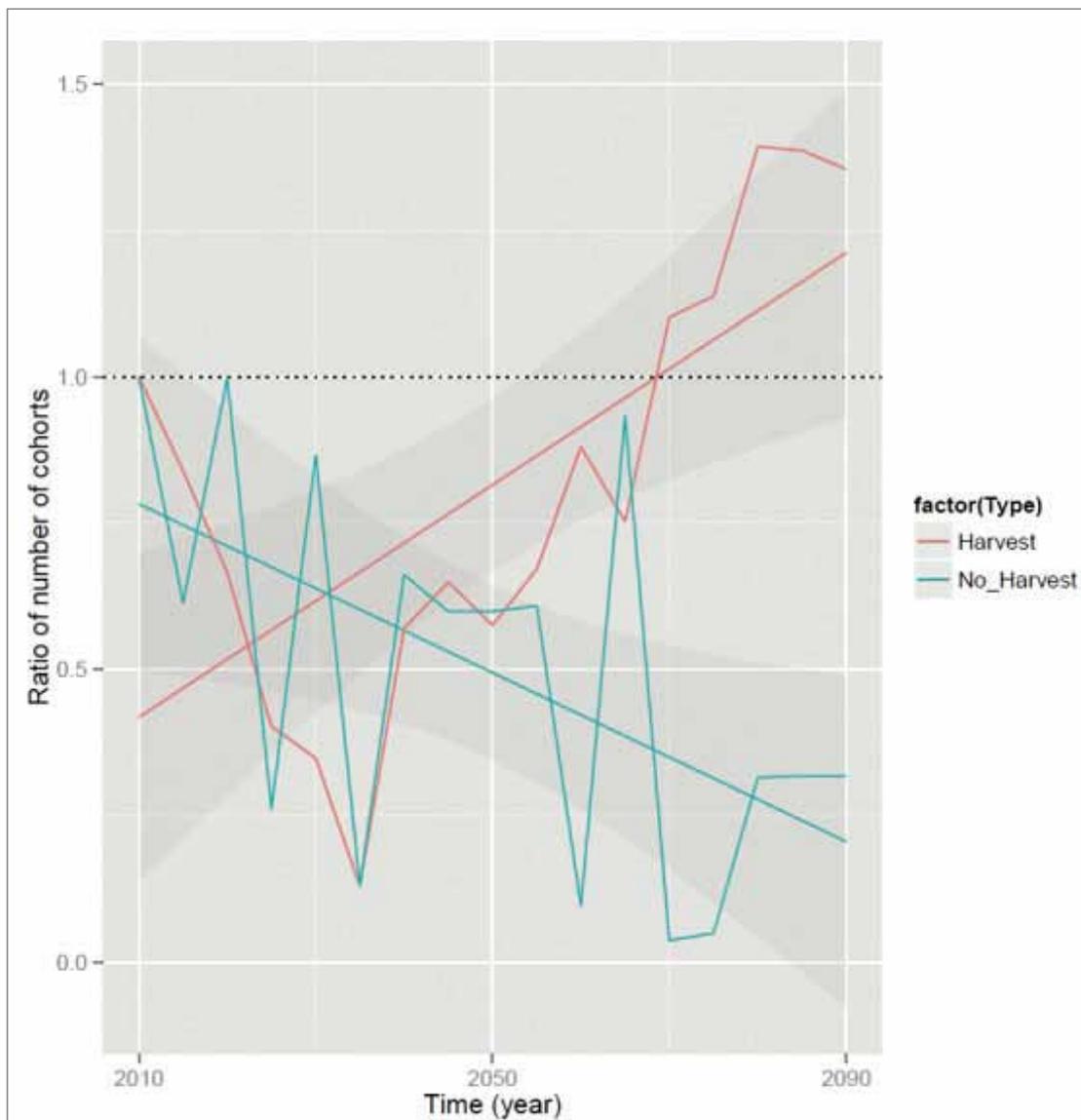
Figure 12. Biomasse totale vivante sur pied en Giga grammes de matière sèche pour *Quercus suber* sans perturbation (courbe noire) et avec perturbation harvest (courbe rouge en tirets) pour toute la forêt de la Maâmora. La ligne rouge en pointillés représente la biomasse vivante sur pied + la biomasse récoltée dans le cas avec perturbation harvest. (Modèle CANESM2 et scénario RCP 4.5).



Sans régénération artificielle, la biomasse sur pied de *Quercus suber* diminue sans réelle reprise. C'est à partir de la 25^{ème} année que la biomasse totale avec interventions forestières dépasse celle sans intervention. En 2090, la biomasse sur pied avec interventions est quasiment quatre fois plus importante que sans intervention et dépasse la biomasse sur pied en 2010.

3.3.4 Le liège

Figure 13. Comparaison du ratio du nombre de cohortes se trouvant dans la gamme d'âge pour produire du liège avec (courbe rouge) et sans (courbe bleue) perturbation harvest par rapport à 2010 dans la forêt de la Maâmora (Modèle CANESM2 et scénario RCP 4.5).



La production du liège est une activité très importante dans la forêt de la Maâmora. Sans relation connue entre la biomasse du chêne liège et de la production du liège nous ne pouvons pas simuler la production du liège directement. Ici est présentée l'évolution du nombre de cohortes qui se trouvent dans la gamme d'âge de production du liège (26 à 75 ans dans la Maâmora).

La simulation sans perturbation montre que le nombre de ces cohortes diminue au fil du temps par rapport à 2010. Contrairement, pour la simulation avec perturbation harvest, après une diminution du nombre de cohortes se trouvant dans la gamme d'âge pour produire du liège pendant 25 ans (jusqu'en 2035) avec un minimum de 12,5% du nombre en 2010, on peut remarquer une augmentation de ce nombre de cohortes à peu près continue jusqu'à atteindre et même dépasser le seuil de 2010 vers 2070.

4. Conclusion et recommandations

La citation de George E. P. Box: ‘Essentially, all models are wrong, but some are useful’ (‘Fondamentalement, tous les modèles sont faux, certains sont utiles’) symbolise bien le cas de l’utilisation des modèles dans le domaine forestier. L’ingénieur forestier doit comprendre les mécanismes intrinsèques des modèles avec lesquels il travaille dans le but de pouvoir bénéficier d’une meilleure compréhension des résultats.

Dans le contexte de l’utilisation du modèle LANDIS-II avec son extension Pn-ET succession dans la plateforme MOSAICC au Maroc, le modèle peut apporter des éléments de réponse à certaines questions que se posent les gestionnaires forestiers. Quelle sera le développement d’une espèce cible en fonction du climat? Sa production en biomasse? La production des produits forestiers non-ligneux associés à cette espèce? Quelles seront les espèces les plus aptes à la production dans le futur? Quel type de gestion forestière appliquer? La gestion actuelle est-elle adaptée à un climat changeant?

En analysant les résultats obtenus dans la Maâmora, en se basant sur les cartes de la distribution de *Quercus suber*, nous pouvons avancer que la régénération naturelle à elle seule ne permet pas de perpétuer l’espèce dans un climat changeant. La partie Est de la forêt est la plus vulnérable, ne permettant que partiellement ou pas du tout, selon le modèle climatique utilisé, la réalisation de la régénération naturelle d’ici la fin du siècle.

À l’horizon 2090 en se basant sur la biomasse moyenne totale par site, on remarque un effet négatif de l’impact du changement climatique sur le *Quercus suber* (significatif pour deux modèles sur trois). En plus de voir sa distribution dans l’espace diminuer, le chêne liège pourrait donc dans l’avenir produire moins de biomasse à l’hectare sous un climat changeant.

Les produits forestiers non-ligneux (PFNL) étant d’une importance capitale au Maroc, il était nécessaire de tenter d’étudier l’évolution de la production de liège dans le temps au niveau de la Maâmora avec MOSAICC. Il s’est avéré difficile de pouvoir déterminer la production du liège sans relation connue entre cette production et la biomasse sur pied de *Quercus suber*. Cette relation est présentement le sujet d’une étude et sera incorporée à la plateforme dans le futur.

En attendant les résultats de cette étude, nous avons mis en évidence, en plus de la diminution du nombre de sites occupés par *Quercus suber* et de sa production en biomasse à l’hectare dans le temps, le nombre de cohortes se trouvant dans la gamme d’âge de production de liège (26 à 75 ans dans la Maâmora). Ce nombre tend à diminuer au fil du temps. Ces trois résultats nous permettent de supposer à une diminution de la production du liège dans le temps et à l’impact du changement climatique sur cette production. Aucune valeur chiffrée ne peut malheureusement encore être avancée sans étude complémentaire. La méthode peut cependant être appliquée avec d’autres PFNL dans d’autres contextes forestiers.

Une autre essence hautement représentée dans la Maâmora est l’*Eucalyptus camaldulensis* qui quant à lui ne voit pas sa surface varier fortement mais sa production de biomasse à l’hectare tend à subir un impact négatif sous le scénario le moins optimiste, RCP 8.5 (significatif pour deux modèles sur trois).

En appliquant la gestion forestière en cours, il a été mis en évidence que la présence du *Quercus suber* peut être maintenue si la gestion forestière est bien appliquée et que la pression anthropique (coupes délictueuses, feux de forêt, ...) n’augmente pas dans le temps. La distribution semble stable dans le temps pour les trois modèles et les différents scénarios climatiques.

La biomasse totale moyenne de *Quercus suber* à l'hectare est à peu près stable dans le temps et cela se reflète dans le nombre de cohortes dans la gamme d'âge de production de liège qui augmente à l'horizon 2090. En comparant les biomasses totales des simulations avec et sans gestion forestière on met en évidence le fait qu'il faut en effet 25 ans pour que la gestion forestière commence à avoir un impact positif sur l'essence en question. La gestion appliquée actuellement semble donc adaptée à la conservation du *Quercus suber*.

Plusieurs espèces telles que *Acacia cyclops*, *Eucalyptus sideroxylon*, *Eucalyptus gomphocephala*, et *Pinus pinea* devraient être prises en considération pour les futurs plans de gestion. En effet, ces espèces présentent une bonne résilience au changement climatique et pourraient être plus adaptées à la production dans le siècle à venir.

5. Utilité et Critiques du modèle

L'utilisation des modèles de simulation se développe dans tous les domaines scientifiques. C'est le cas également dans des domaines à forte tradition comme les sciences forestières. On peut s'interroger sur le bienfondé de cette évolution: la forêt virtuelle simulée sur ordinateur peut-elle nous aider à mieux comprendre la nature qui nous entoure ou éloigne-telle de plus en plus le scientifique de la réalité du terrain?

À l'échelle du paysage, le modèle LANDIS-II croise des couches d'information décrivant la végétation, le sol, les perturbations naturelles et la gestion et permettent de simuler l'évolution de chaque maille de territoire en fonction des conditions locales et des interactions avec les mailles adjacentes. On peut par exemple utiliser ce modèle pour regarder l'impact de différents plans de gestion sur l'évolution de l'abondance des essences forestières dans un massif forestier. À l'échelle du peuplement, le modèle LANDIS-II permet de prédire les changements de production forestière en fonction du climat, du sol et des flux de carbone et d'eau dans les arbres. Il permet de simuler comment la compétition pour la lumière, la croissance de chaque individu, la mortalité et le recrutement, mais également les interventions sylvicoles, déterminent la dynamique du peuplement.

Dans un cadre de recherche, on peut envisager d'utiliser ce modèle pour réaliser des expérimentations virtuelles en faisant varier de nombreux paramètres, avec des répliques de simulation pour intégrer la variabilité liée aux processus stochastiques intégrés dans le modèle, une analyse de sensibilité pour déterminer les facteurs les plus influents et une analyse de surfaces de réponse pour les différentes variables d'intérêt.

S'il permet des applications puissantes et variées, ce modèle, comme tous les modèles de simulation, présente malheureusement également des limites. Par rapport à d'autres modèles, LANDIS-II produira, fort probablement, des résultats différents. Les prédictions de déplacements d'essences en réponses au changement climatique peuvent ainsi être très différentes par comparaison à d'autres modèles. Les prédictions de ce modèle comportent nécessairement des incertitudes liées à la méconnaissance sur les processus modélisés, les incertitudes sur les valeurs de paramètres, et les processus stochastiques simulés. Il est indispensable d'en tenir compte pour relativiser les prédictions quantitatives fournies par la simulation.

Par nature, un modèle est forcément une simplification de la réalité. Les processus qui peuvent interférer sur la dynamique d'une forêt sont très nombreux. Le modélisateur est obligé de sélectionner les processus qui lui semblent les plus importants pour explorer une question donnée et donc de réduire le champ de ses prédictions. Dans ce contexte, LANDIS-II ne prend pas en considération la notion de densité des peuplements, qui constitue un paramètre important dans la description des types de peuplement au Maroc et dont dépend, inévitablement, la quantité de production en biomasse.

Une autre critique à ce modèle est qu'il ne dispose pas d'une perturbation relative au pâturage. Dans le contexte marocain, le surpâturage est l'une des pressions qui constitue une contrainte parmi les plus importantes sur le couvert forestier. La gestion forestière doit nécessairement composer avec cet élément et par conséquent la simulation de l'évolution du couvert forestier en fonction du climat doit être faite en considérant ce facteur.

Le modèle LANDIS-II présente aussi l'inconvénient de demander beaucoup de paramètres pour la caractérisation des espèces forestières et la simulation de leur développement, or la majorité de ces paramètres est non disponible. Heureusement, les développeurs ont suggéré des constantes

pour les paramètres dont les valeurs sont inconnues, mais cela engendre aussi un grand niveau d'incertitude. Alors pour pallier cette lacune, un certain nombre de recherche doit être conduit pour chaque espèce considéré afin de déterminer les vraies valeurs des paramètres clefs.

Un autre facteur qui impacte fortement le développement du couvert forestier au Maroc et qui n'est pas pris en charge directement par le modèle LANDIS-II est l'exploitation délictueuse des forêts. Cette insuffisance a été modélisée d'une manière détournée par la perturbation d'exploitation (Harvest). Enfin, ce modèle peut être très utile, au moins du point de vue de la recherche, pour simuler le développement du couvert forestier en fonction de différents scénarios climatiques et donner certaines pistes aux gestionnaires pour atténuer l'effet des changements climatiques.

6. Références

- **Aafi A.** 2007. Etude de la diversité floristique de l'écosystème de chêne-liège de la forêt de la Maâmora. Rabat: Thèse de Doctorat d'Etat Es-Sciences Agronomiques, I.A.V Hassan II, 190 p.
- **Aber, J.D. & Federer, A.C.** 1992. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia* 92, 463-474.
- **Aber, J.D., Ollinger, S.V., Federer, A., Reich, P.B., Goulden, M.L., Kicklighter, D.W., Melillo, J.M. & Lathrop, R.G.** 1995. Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climate Research* 5, 207-222.
- **Aukema, J.E., McCullough, D.G., Von Holle, B., Liebhold, A.M. & Britton, K.O.** 2010. Historical accumulation of nonindigenous forest pests in the continental US *BioScience* 60: 886–897.
- **Bagaram, B.M.** 2014. Elaboration d'une base de données géographique et catalogue des stations de la subéraie de la Maâmora. Mém. 3ième cycle, ENFI, 72 p.
- **Bagnouls, F. & Gausson H.** 1953. Saison sèche et indice xérothermique. *Bulletin Société Histoire Naturelle, Toulouse*, tome 88, pp: 193-239.
- **Bazi, M.H., Verberne, E.L.J, Disjksterhuis, G.H. & Sanou, A.A.** 1995. Les modèle de simulation comme outils de gestion des sols et de développement agricole: exemple du modèle «cultures pluviales du Burkina-Faso» In: Groot, J.J.R, and Coulibaly, A. (eds) *Les modèles de simulations de la croissance végétale comme outils de recherche développement. Rapports PSS N011 Compte rendu du séminaire de Bamako, Mali, du 7 au 8 Nov 1994. Wageningen*, pp 53-66.
- **Belinda, E., Medlyn, R., McMurtrie, R., Dewar, M. & Jeffreys, P.** 2000. Soil processes dominate the long-term response of forest net primary productivity to increased temperature and atmospheric CO2 concentration. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(6): 873-888.
- **Blonder, B., Violle, C., Patrick, L. & Enquist, B.** 2011. Leaf venation networks and the origin of the leaf economics spectrum. *Ecology Letters*.
- **Bossel, H.** 1994. *Modeling and simulation*. A.K. Peters Ltd., Wellesley, MA, 484 p.
- **Correia, A. C., Tomé, M., Pacheco, C. A., Faias, S., Dias, A. C., Freire, J., Carvalho, P. O. & Pereira, J. S.** 2010. Biomass allometry and carbon factors for a Mediterranean pine (*Pinus pinea* L.) in Portugal. *Forest Systems, Madrid*, v. 19, n. 3, p. 418–433.
- **Cuddington, K., Fortin, M.-J., Gerber, L. R., Hastings, A., Liebhold, A., O'Connor, M. & Ray, C.** 2013. Process based models are required to manage ecological systems in a changing world. *Ecosphere* 4, 20.
- **Dzotsi, K.** 2002. Application du modèle CERES-Maize de DSSAT à l'analyse de stratégies de semis pour le maïs (*Zea mays*) dans les conditions de Sévé-Kpota, Mémoire d'ingénieur Agronome. UL-ESA, Lomé, 92 P.
- **FAO.** 1982. *Les eucalyptus dans les reboisements*. Collection FAO: Forêts, n. 11. Rome.
- **Foster, J.R.** 2011. *Forest insect defoliation patterns and carbon dynamics: Linking remote sensing with simulation models*. PhD Dissertation, University of Wisconsin.

- **GIEC.** 2007. *Changements Climatiques: Rapport de synthèse*, 114 p.
- **Godfrey, K.** 1983. *Compartmental models and their applications*. Academic Press, New York, NY, 291 p.
- **Gustafson, E. J., Shifley, S. R., Mladenoff, D. J., Nimerfro, K. K. & He H. S.** 2000. Spatial simulation of forest succession and timber harvesting using LANDIS. *Canadian Journal of Forest Research* 30:32–43.
- **Gustafson, E.J.** 2013. When the past can't be used to predict the future: using mechanistic models to predict landscape ecological dynamics in a changing world. *Landscape Ecology* 28, 1429-1437.
- **HCEFLCD.** 2012. *PV d'aménagement de la forêt de Maâmora*. Bureau d'études TTOBA. 179p.
- **IPCC.** 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- **Jouzel, J. & Debroise, A.** 2007. *Le climat: jeu dangereux: Dernières nouvelles de la planète*.
- **Maseyk K.S., Lin T., Tongbao M.L., Rotenberg, E., Grünzweig, J.M., Schwartz, A. & Yakir, D.** 2008, Physiology-phenology interactions in a productive semi-arid pine forest. *New Phytologist*, 178: 603–16.
- **Kattge, J., Knorr, W., Raddatz, T. & Wirth, C.** 2009. Quantifying photosynthetic capacity and its relationship to leaf nitrogen content for global-scale terrestrial biosphere models. *Global Change Biology* 15:976-991.
- **Kerkhoff, A. J., Fagan, W. F., Elser, J. J. & Enquist, B. J.** 2006. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants. *American Naturalist* 168:E103-E122.
- **Laughlin, D.C., Bakker, J.D., Stoddard, M.T., Daniels, M.L., Springer, J.D., Gildar, C.N., Greena, A.M. & Covington, W.** 2004. Toward reference conditions: wildfire effects on flora in an old-growth ponderosa pine forest. *Forest Ecology and Management* 199, 137-152.
- **Laughlin, D.C., Bakker, J.D., Stoddard, M.T., Daniels, M.L., Springer, J.D., Gildar, C.N., Green, A.M. & Covington, W.W.** 2004. Toward reference conditions: wildfire effects on flora in an old-growth ponderosa pine forest. *Forest Ecol. Manage.* 199, 137–152.
- **Lepoutre, G.** 1965. Régénération artificielle du chêne-liège et équilibre climatique de la subéraie en forêt de la Mâamora. *Ann. Rech. For. Maroc*. Tome 9, 188 p.
- **Liu, F., Mladenoff, D.J., Keuler, N.S. & Moore, L.S.** 2011. BROADSCALE variability in tree data of the historical Public Land Survey and its consequences for ecological studies. *Ecological Monographs* 81(2): 259-275.
- **Milla, R. & Reich, P.B.** 2011 *Annals of Botany* 107: 455–465, 2011.
- **Ogaya, R. & J. Penuelas.** 2003. Comparative field study of *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*: photosynthetic response to experimental drought conditions. *Environmental and Experimental Botany* 50:137-148.
- **Paula, S., Arianoutsou, M., Kazanis, D., Tavsanoğlu, Ç., Lloret, F., Buhk, C., Ojeda, F., Luna, B., Moreno, J. M., Rodrigo, A., Espelta, J. M., Palacio, S., Fernández-Santos, B., Fernandes, P. M. & Pausas, J. G.** 2009. Fire-related traits for plant species of the Mediterranean Basin. *Ecology* 90:1420.

- **Price, C.A. & Enquist, B.J.** 2007. Scaling of mass and morphology in Dicotyledonous leaves: an extension of the WBE model. *Ecology* 88(5): 1132–1141.
- **Reich, P. B., Oleksyn, J. & Wright, I. J.** 2009. Leaf phosphorus influences the photosynthesis-nitrogen relation: a cross-biome analysis of 314 species. *Oecologia* 160:207-212.
- **Sghaier, T. & Ammari, Y.** 2012. Croissance et production du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie, *ecologia mediterranea* – Vol. 38 (1).
- **Theron, J.M., Van Laar, A., Kunneke, A. & Bredenkamp, B.V.** 2004. A preliminary assessment of utilizable biomass in invading *Acacia* stands on the Cape coastal plains. *S Afr J Sci.*;100:123–125.
- **Wieser, G., Peters, J., Luis, V.C., Morales, D. & Jimenez, M.S.** 2002. Ecophysiological studies on the water relations in a *Pinus canariensis* stand, Tenerife, Canary Islands. *Phyton* 42, 291–304.
- **Wirth, C. & Lichstein, J. W.** 2009. The Imprint of Species Turnover on Old-Growth Forest Carbon Balances - Insights From a Trait-Based Model of Forest Dynamics. Pages 81-113 in C. Wirth, G. Gleixner, and M. Heimann, editors. *Old-Growth Forests: Function, Fate and Value*. Springer, New York, Berlin, Heidelberg.



Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

Acquérir de l'information sur les impacts potentiels du changement climatique est la clé dans l'élaboration des plans nationaux et des politiques nationales d'adaptation. Compte tenu des grandes incertitudes quant à l'avenir du climat et de la réponse des systèmes naturels et humains, des simulations de modèles offrent la possibilité intéressante de tester des scénarios, d'explorer les impacts potentiels et de comprendre comment les différents processus interagissent les uns avec les autres.

Dans le cadre du programme conjoint de l'UE et de la FAO sur l'amélioration de la gouvernance mondiale pour la réduction de la faim, la FAO a mis au point un système intégré afin d'effectuer des évaluations des impacts du changement climatique au niveau national. Ce système basé sur un serveur appelé MOSAICC (système de modélisation des impacts du changement climatique sur l'agriculture) a été construit en collaboration avec diverses institutions scientifiques en Europe (universités, centres de recherche) et combine la réduction d'échelle des données climatiques (« climate data downscaling »), avec de la modélisation hydrologique, agricole et économique.

La nouvelle composante forestière de MOSAICC a été développée, en conformité avec les intérêts et besoins au niveau national et régional du Maroc, évaluant les impacts du Changement Climatique sur la dynamique forestière. Cette étude effectuée sur la forêt pilote de la Maâmora a pour but de tester ce nouvel outil.

ISBN 978-92-5-209030-4



9 789252 090304

15278F/1/12.15



European Union

La présente publication a été élaborée avec l'aide de l'Union européenne.
Le contenu de la publication relève de la seule responsabilité de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et ne peut aucunement être considéré comme reflétant le point de vue de l'Union européenne.