Simulation de l'évolution de la dynamique forestière dans les Landes de Gascogne sous différents scénarios socioéconomiques

Christophe Orazio – Rebeca Cordero – Baptiste Hautdidier – Céline Meredieu – Patrick Vallet

Dans les approches territoriales comme dans les démarches prospectives, l'échelle pour évaluer les conséquences des choix des acteurs forestiers n'est plus la parcelle, mais un niveau où le contexte social et écologique pourrait être considéré comme pertinent. L'intérêt d'une étude à l'échelle de territoires de plusieurs milliers d'hectares est de prendre en compte simultanément les contraintes imposées par la structure des propriétés, le milieu et les peuplements en place, mais aussi d'évaluer des indicateurs qui ne font sens qu'à ces échelles dans le cadre de scénarios prospectifs contrastés. Les résultats sont des outils d'aide à la planification et l'évaluation de politiques régionales.

La zone d'étude présentée ici a été utilisée précédemment comme cas d'étude du projet FORSEE (http://forsee.iefc.net), principalement pour évaluer des indicateurs de gestion durable, et fait actuellement partie des sites d'étude intensive (*ISS-Intensive Studies Sites*) du réseau EVOLTREE pour l'étude de la biodiversité des gènes et des espèces. Cette zone, définie par les limites administratives de treize communes, est centrée sur la commune de Pontenx-les-Forges (zone appelée ci-après Pontenx), au cœur du département des Landes. Elle couvre 101 000 ha dont plus de 80 000 ha de forêts. Elle s'étend sur un rectangle de 55 km de long sur 34 km de large, incluant 23 km de façade maritime. Orientée selon un axe est-ouest, la zone d'étude balaye des situations environnementales et sociales contrastées. Elle couvre ainsi la quasi-totalité du bassin versant du ruisseau de Canteloup, puis à l'est la tête de bassin de la Grande Leyre. Incluant à la fois un cordon littoral dunaire et une zone de plateau entrecoupée de ripisylves, elle présente une grande diversité des milieux du massif des Landes de Gascogne dont les deux sylvoécorégions principales du massif landais : Landes de Gascogne F21 et Dunes atlantiques F22 (IGN, 2011). Elle offre des contextes variés en matière d'écologie, de gestion et de fréquentation récréative (Poissonnet *et al.*, 2007) mais aussi un contexte particulier de reconstitution forestière post-tempête 2009.

La forêt est composée majoritairement de peuplements dont l'espèce principale est le Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.). Les autres peuplements sont composés de feuillus tels que le Chêne vert (*Quercus ilex* L.) ou le Chêne liège (*Quercus suber* L.) et se trouvent essentiellement sur le littoral, souvent en mélange avec les pins. Le Chêne pédonculé (*Quercus robur* L.), l'Aulne glutineux (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) et les Saules (*Salix spp.*) sont présents en bordure de zones humides. On retrouve aussi le Chêne pédonculé ou le Chêne tauzin près de villages et d'habitations (airiaux)[1] ou le long des cours d'eau (CRPF Aquitaine, 2006). Quelques plantations

(1) Un airial est un espace enherbé, où sont disséminés de grands chênes, de petites dépendances et des maisons à ossature en bois, avec toiture à longs pans, façades à l'est et le plus souvent à auvents pour les maisons de maître.

d'Eucalyptus, de Robinier (*Robinia pseudoacacia* L.) et de Pin taeda (*Pinus taeda* L.) ont fait leur apparition depuis quelques années.

Une importante amélioration de la productivité de la forêt des Landes de Gascogne depuis les années 1950 (passant de 4 m^3 à plus de 10 m^3 par hectare et par an) résulte de l'application de techniques spécifiques de sylviculture (assainissement, travail du sol, fertilisation phosphatée, débroussaillage) (CRPF Aquitaine, 2015) mais aussi de l'utilisation de variétés de Pin maritime améliorées (Raffin et Alazard, 2014). Sur le massif landais, à la veille de la tempête Klaus de 2009, la ressource sur pied de Pin maritime s'établissait à 114 millions de m^3 (± 11,5 millions de m^3) (Colin *et al.*, 2010). La récolte de bois représentait alors près de 100 % de l'accroissement biologique, soit de l'ordre de 7,5 millions de m^3 de bois, qui se répartissaient à 65 % en bois d'œuvre et à 35 % en bois d'industrie (CRPF Aquitaine, 2009), représentant une part significative de la production résineuse française.

L'objectif du projet INTEGRAL (http://www.integral-project.eu/) était, à partir de zones d'étude sélectionnées comme celle de Pontenx dans les Landes de Gascogne, d'illustrer de manière quantitative les conséquences de choix de gestion effectués selon des scénarios socioéconomiques prospectifs compatibles avec le territoire pour les 60 prochaines années (Hinterseer *et al.*, 2014). Ce travail s'appuie sur des modèles de dynamique forestière à l'échelle de la parcelle de gestion qui doivent permettre d'intégrer les contraintes liées au territoire et de prendre en compte les contraintes liées aux comportements des acteurs (figure 1, p. 495). En revanche, les évolutions climatiques ne sont pas prises en compte dans ce cas d'étude car nous aurions eu d'une part à scénariser les évolutions climatiques et d'autre part à définir leurs interactions avec les scénarios socioéconomiques prospectifs.

LES 5 SCÉNARIOS PROSPECTIFS SOCIOÉCONOMIQUES

La construction et la description approfondie des scénarios prospectifs sont développées dans le rapport de synthèse sur les scénarios de gestion forestière intégrée en Europe, appliqués à l'Aquitaine (Sergent *et al.*, 2014). Une brève présentation de chacun d'entre eux est donnée dans le tableau I (p. 496). Chaque scénario décrit les types de forêts et les itinéraires sylvicoles qui seront appliqués par les différentes catégories de propriétaires forestiers qui occupent la zone. Le scénario de référence appelé « Gestion traditionnelle (S0) » est un scénario où l'on suppose que la gestion dans la zone d'étude après la tempête Klaus en 2009 est homogène et semblable à la sylviculture pratiquée avant la tempête.

CARACTÉRISATION DE LA ZONE ET DE SA GESTION

Données écologiques

La croissance des peuplements dépend de leur composition, de la fertilité de la station et de la sylviculture. Des photographies aériennes de la zone d'étude de 2009 ont été interprétées pour évaluer la composition, la densité, et les classes d'âges de chacun des peuplements (figure 2, p. 497). Cette photo-interprétation a été possible grâce à une bonne connaissance de la zone combinée à un contrôle systématique sur le terrain d'une sélection de points.

De façon à obtenir une typologie et une carte des stations, une analyse de la dynamique de la phénologie au cours de l'année a été effectuée, en utilisant des indices de végétation calculés à partir des données « moyenne résolution » du capteur satellite MODIS (MOD13Q1 : composites sur

Figure 1 **SCHÉMA GÉNÉRAL DE PRÉSENTATION DU PROJET INTÉGRAL DÉCRIVANT LES SOURCES DE DONNÉES, LES PHASES D'ASSEMBLAGE DE CONNAISSANCES ET DE CALCULS DANS LE CADRE DE LA ZONE DE PONTENX**

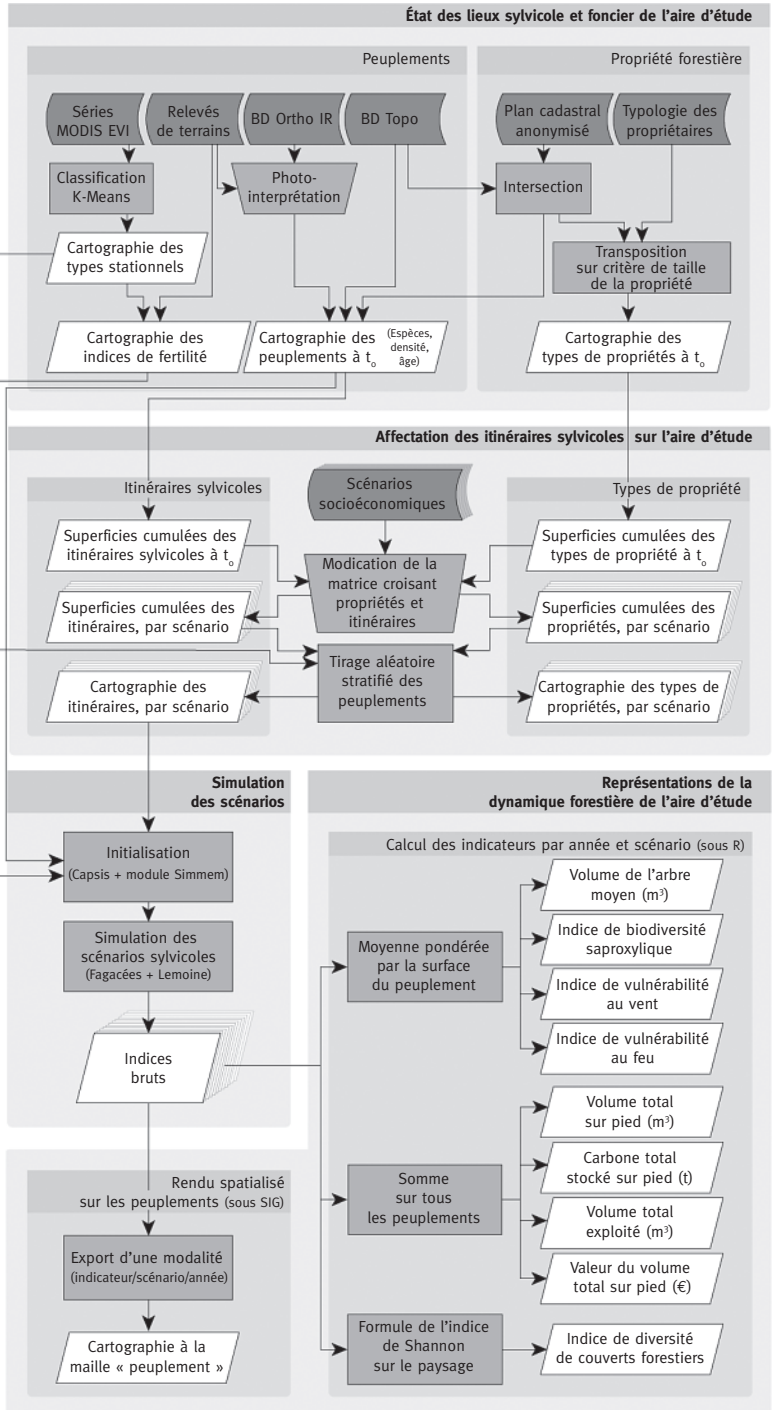


Tableau I **Scénarios prospectifs socioéconomiques du projet INTEGRAL** (Sergent *et al.,* 2014)

« Le tournant énergétique inachevé (S1) »
Les industries de la trituration ont pris le virage de la valorisation énergétique en s'appuyant sur des politiques de soutien à la demande (énergie, climat), une convergence locale avec des grands opérateurs forestiers et une innovation sylvicole orientée vers l'amélioration génétique et le raccourcissement des rotations du Pin maritime. Mais elles n'ont pas achevé leurs mutations ; les tensions sur la ressource ont affaibli leur compétitivité et leurs capacités d'investissements. Surtout, nombre de propriétaires ont hésité à s'engager dans cette intensification productive guidée par l'essor des enjeux énergétiques. Au final, on assiste au développement d'une sylviculture à deux vitesses, faisant coexister des itinéraires « biomasse » avec des itinéraires sylvicoles plus classiques. L'offre en services écosystémiques reste peu développée, à l'exception toutefois des zones littorales et périurbaines.
« Mutation industrielle et tensions sur les usages du sol (S2) »
Le tissu industriel local a réussi une mutation guidée par le paradigme des bioraffineries et de la chimie verte. Cette réorientation industrielle s'appuie sur un renforcement de la coordination sectorielle autour d'une politique de l'offre et d'une intensification de la sylviculture. Les services écosystémiques se développent sous l'angle des « services joints » à la production. Mais les tensions avec l'agriculture, également bien positionnée sur les enjeux énergétiques, se sont également accentuées. De plus, l'intensification de la gestion forestière et sa convergence avec les logiques agricoles contribuent également à « déterritorialiser » la filière forêt-bois et à couper les liens avec le public.
« Gisement landais (S3) »
Le tissu industriel régional s'est fortement amoindri. L'émergence d'innovations de rupture a profondément transformé le secteur de l'énergie avec le développement de stratégies industrielles de concentration et de relocalisation à proximité des nœuds de transport. Ce mouvement est accompagné par l'Union européenne qui a développé des politiques de compétitivité autour des enjeux de la transition énergétique et de la mutation industrielle. De par son ampleur et sa gestion forestière dynamique, le massif forestier des Landes de Gascogne est en capacité de répondre à ces réorientations et conserve un fort pouvoir d'attractivité. Il s'inscrit désormais dans une logique de « gisement » et de réseaux d'approvisionnement dont les ramifications se déploient aux échelles nationales et européennes. Localement, les espaces forestiers peuvent être également convoités en tant que réserve foncière dans un contexte d'urbanisation diffuse aux marges des aires métropolitaines.
« Économie verte forestière (S4) »
La filière forêt-bois régionale s'organise autour d'un tissu d'industries et de PME innovantes dans le domaine de la chimie verte, de l'écoconstruction et du matériau bois. Les innovations sylvicoles sont ainsi résolument orientées vers l'amélioration des qualités « bois d'œuvre » du Pin maritime et la valorisation des usages « sciages » d'essences feuillues. Le renforcement de la coordination sectorielle s'effectue dans le cadre de régulations marchandes et publiques incluant des dispositifs d'écoconditionnalités. Toutefois, malgré l'emprise croissante des zonages dédiés à l'accueil du public et à la protection de la biodiversité, les synergies développées autour des services écosystémiques fournis par la forêt s'inscrivent moins dans une logique de multifonctionnalité que d'équilibre territorial.
« Le pacte territorial (S5) »
Suite à la fragilisation du tissu industriel landais, les collectivités territoriales tentent de maintenir une demande, *via* l'impulsion de projets bois énergie notamment, et de promouvoir une sylviculture contribuant au développement de leurs territoires par la production de biens mais aussi de services. Cette appropriation des enjeux forestiers par les collectivités territoriales s'appuie sur un élargissement de leurs compétences et un renforcement de leurs capacités de régulation dans le sillage de la décentralisation. Au final, les modalités d'accompagnement de l'action forestière diffèrent selon les objectifs fixés par les territoires en concertation avec les groupements de propriétaires et les opérateurs forestiers. En effet, l'intégration des intérêts professionnels de l'amont de la filière dans les arènes de décisions infrarégionales s'est accentuée. Soutenue institutionnellement mais essentiellement portée par des initiatives privées, l'offre en services écosystémiques s'est également développée avec une réussite variable selon les territoires.

Figure 2

CLASSES D'ÂGE OBTENUES PAR PHOTO-INTERPRÉTATION DE PHOTOS AÉRIENNES BD ORTHO® DE 2009 FOURNIES PAR PIGMA SUR LA ZONE D'ÉTUDE DE PONTENX

La couleur rose pâle indique des parcelles de jeunes pins maritimes replantées après avoir subi des dégâts lors de la tempête de 2009

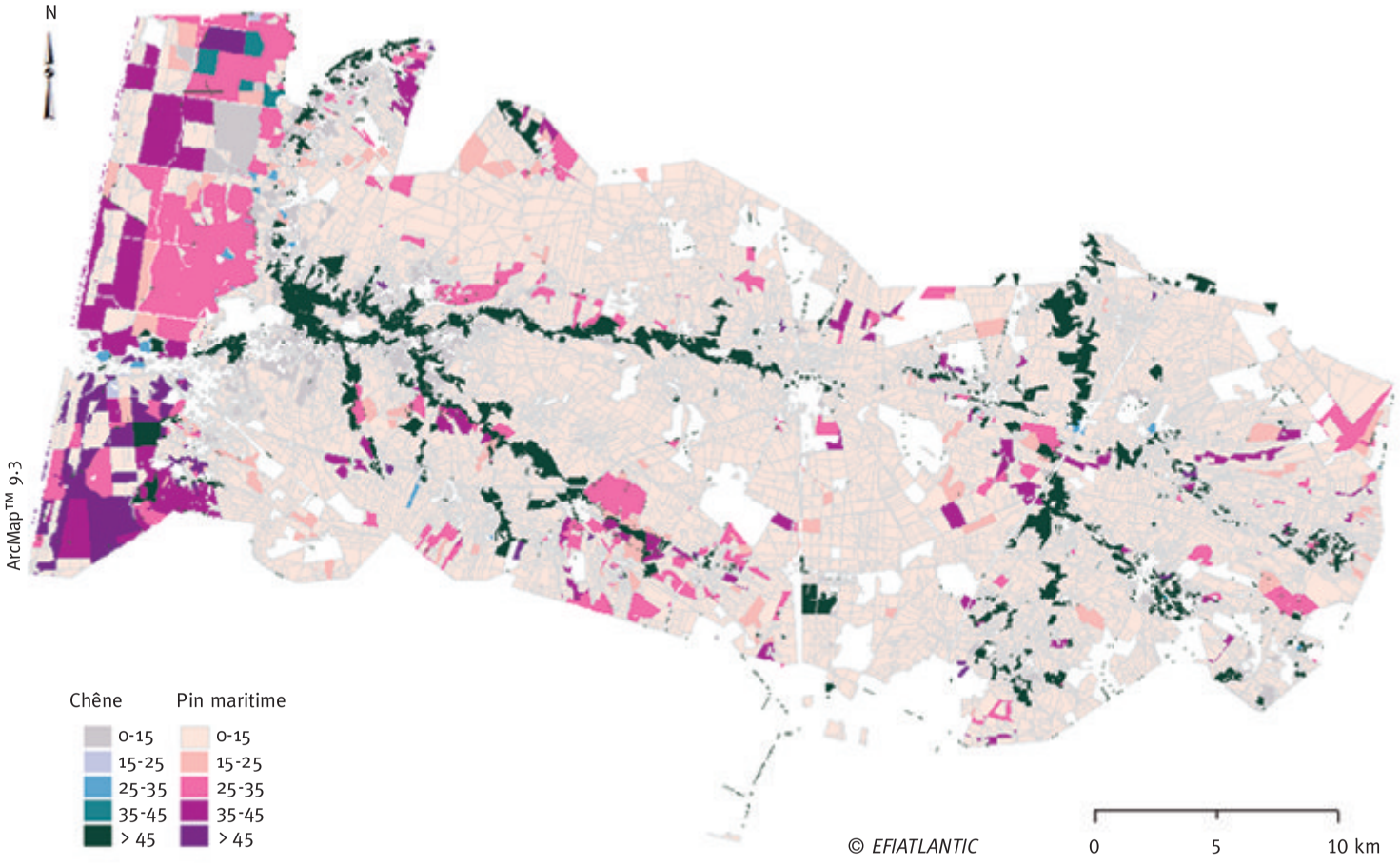


Figure 3

CARTE DE TYPES STATIONNELS OBTENUS SUITE À L'INTERPRÉTATION DES CLASSES K-MEANS 2000-2014 (MODIS EVI-MOD13Q1) SUR LA ZONE D'ÉTUDE DE PONTENX

16 jours, couvrant la période 2000 à 2014). Basée sur l'hypothèse selon laquelle la végétation du sous-bois peut être discriminée par l'analyse de séries à long terme des données de télédétection haute fréquence (Yauschew-Raguenes, 2012) réalisée grâce à une méthode de regroupement hiérarchique (algorithme K-means), elle a permis d'identifier trois classes au sein des couverts forestiers des résineux, correspondant aux grands types stationnels (lande humide, mésophile ou sèche) du massif landais (figure 3, p. 498) couramment distingués par les gestionnaires forestiers. À ces trois grands types stationnels a été associé un indice de fertilité pour les peuplements de Pin maritime selon leur localisation générale : dans les Landes, la hauteur dominante à 40 ans varie de 27 m en lande humide, 23,5 m en lande mésophile et 19 m en lande sèche. Ces valeurs sont respectivement de 22 m, 19 m et 16 m en zones de dunes. L'hypothèse forte selon laquelle les aides pour le drainage allaient être utilisées massivement dans le cadre de la reconstitution a été formulée. Ainsi il a été considéré que toutes les landes humides allaient être drainées et assimilées aux stations les plus fertiles. Selon Chaperon (1986), les landes humides constituent naturellement un milieu peu favorable à la production des pins (5 à 7 m^3/ha/an) mais peuvent devenir des stations hautement productives grâce à l'assainissement (12 à 15 m^3/ha/an). Pour les peuplements de Chêne, une normalisation entre 0 et 1 de l'indice de fertilité a été réalisée à partir des données de l'Inventaire forestier national (Vallet *et al.*, 2013). La valeur de l'indice normalisé correspond au quantile des fertilités dans la ressource à l'échelle nationale (par exemple 0,6 signifie que 60 % des peuplements sont moins fertiles). Les mesures effectuées sur le terrain nous ont permis d'affecter une très forte fertilité (0,95) aux ripisylves et une très faible fertilité dans les zones de landes (0,05). Ces types stationnels, les indices de fertilité et les niveaux de productivité associés sont considérés comme stables sur la période de simulation choisie.

Catégories de propriétaires forestiers

Les catégories de propriétaires sur la zone ont été décrites grâce à la typologie présentée par Sergent *et al.* (2013). Le groupe « Entrepreneur forestier » (G1A) est attribué aux propriétés les plus grandes, avec plus de 500 hectares et représente 30 % de la surface de la zone de Pontenx ; le groupe « Gestionnaire public » (G1B) en est une variante, permettant de marquer les spécificités de la gestion de l'ONF (Office national des forêts) en terrain domanial et occupe 12 % de la surface. Le groupe « Traditionnaliste » (G2) occupe 43 % des surfaces de la zone et se divise à son tour en deux sous-groupes : des forestiers potentiellement à plein-temps qui possèdent des propriétés de 250 à 500 hectares (G2A) et des forestiers à temps partiel avec des propriétés entre 25 et 250 hectares (G2B) ; le groupe « Extérieur passif » (G3) compte des propriétés relativement petites, de 1 à 25 hectares maximum et sa surface occupe 12 % sur la zone d'étude. Afin de compenser le caractère abrupt de ces seuils, une partie des propriétés du groupe G2B a été arbitrairement réaffectée aux groupes voisins (20 % des propriétés de plus 100 ha vers le G2A, 20 % des plus petites vers le G3). Finalement, le profil « Environnementaliste » (G4), attribué à 5 % des propriétés ayant une superficie entre 4 et 25 ha, traduit la réceptivité accrue d'une petite partie des propriétaires pour une gestion plus « extensive » (longue révolution, sylviculture irrégulière, promotion des chênes).

À partir de la matrice cadastrale anonymisée, chaque parcelle cadastrale de forêt a été associée à une catégorie de propriétaires forestiers sur la base des seuils de surface des propriétés de manière aléatoire (figure 1, p. 495).

Itinéraires sylvicoles

Différents itinéraires sylvicoles réalistes pour le Pin maritime et les chênes locaux, qui ont été retenus pour cette étude avaient été proposés dans le cadre d'une expertise post-tempête menée par le GIP ECOFOR de 2009 à 2011 sur la reconstitution du massif forestier landais (GIP ECOFOR, 2011) (tableau II, p. 500). Pendant la consultation des propriétaires, des itinéraires de production

Tableau II **Itinéraires sylvicoles appliqués sur la zone d'étude de Pontenx**

Itinéraires sylvicoles	Objectif volume	Structure gérée par le modèle	Type de régénération	Éclaircies	Récolte
I1 (Pin maritime-haute qualité)	› 2 m³ Vu	Peuplement régulier, monospécifique	Plantation 1 250 tiges/ha	5 éclaircies	55 ans ; 340 tiges/ha
I2 (Pin maritime-standard)	1 à 1,6 m³ Vu	Peuplement régulier, monospécifique	Plantation 1 250 tiges/ha	4 éclaircies	45 ans ; 300 tiges/ha
I3 (Pin maritime-courte révolution)	0,3 à 0,4 m³ Vu	Peuplement régulier, monospécifique	Plantation 1 250 tiges/ha	1 éclaircie	25 ans ; 700 tiges/ha
I4 (Pin maritime-semi-dedié)	12 ans (30 t/ha) 32 ans (1 m³)	Peuplement régulier, monospécifique	Plantation 2 500 tiges/ha	1 éclaircie biomasse puis 4 éclaircies	32 ans ; 300 tiges/ha
I5a (Pin maritime-biomasse)	70 t/ha	Peuplement régulier, monospécifique	Plantation 2 500 tiges/ha	Aucune	14 ans
I5b (Eucalyptus-biomasse)	200 t/ha	Peuplement régulier, monospécifique	Plantation 1 250 tiges/ha	Aucune	10 ans
I6 (sans gestion)	–	Peuplement régulier, monospécifique	Régénération naturelle	Aucune	Sans récolte
I7 (Robinier)	500-600 t/ha	Peuplement régulier, monospécifique	Plantation 2 000-2 700 tiges/ha	3 éclaircies	35-40 ans
I8a (Chêne de ripisylve)	bois d'éclaircie	Peuplement régulier, monospécifique	Régénération naturelle	Éclaircie (densité relative = 0,4)	Sans coupe rase
I8b (Chêne de plateau)	bois d'éclaircie	Peuplement régulier, monospécifique	Régénération naturelle	Éclaircie (densité relative = 0,4)	Sans coupe rase

Vu = volume unitaire

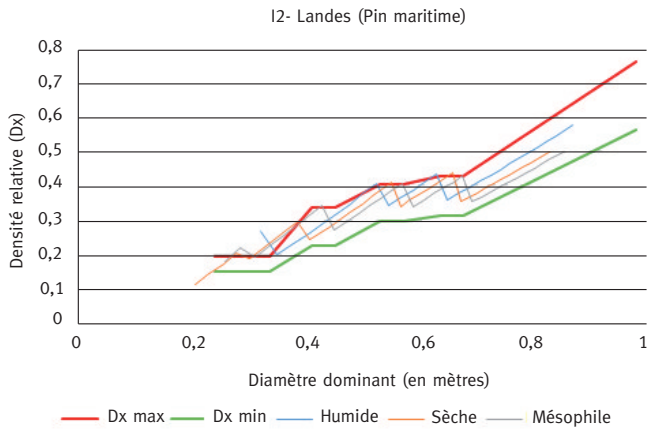
de biomasse pour l'Eucalyptus et des plantations de Robinier ont été ajoutés (itinéraires I5b et I7, tableau II, ci-dessus). À partir de l'état initial de la zone, l'évolution des peuplements a été simulée selon ces différents itinéraires sylvicoles pour le Pin maritime et le Chêne (figure 4, p. 501).

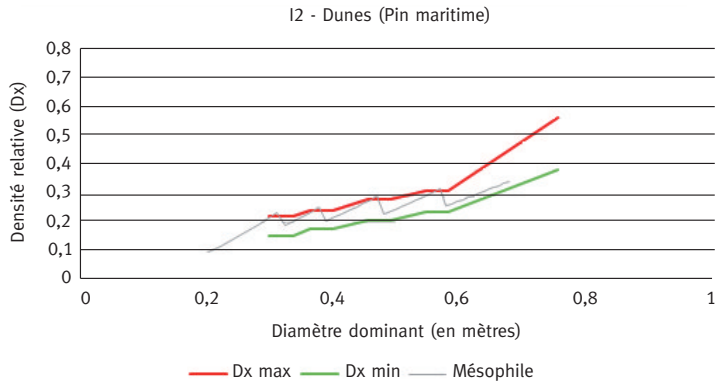
Ces itinéraires sylvicoles présentent une diversité bien plus grande que ceux réalisés actuellement car une grande partie des opérateurs préfèrent mettre en œuvre des itinéraires à révolution de 45 ans plutôt que des itinéraires à révolution plus courte dédiés (I5) ou semi-dédiés (I4). Les itinéraires sylvicoles proposant un changement d'essences ne semblent pas être actuellement utilisés : un bilan effectué fin octobre 2015 révèle que seulement 1,5 % de la surface reboisée post-tempête (communication GIP ATGERI(2), 2015) l'a été en utilisant la clause biodiversité (CRPF Aquitaine et ONF, 2011).

(2) GIP ATGERI : Groupement d'Intérêt Public « Aménagement du Territoire et Gestion des Risques » qui a été chargé par l'État d'assurer un suivi cartographique du nettoyage et de la reconstitution des parcelles forestières bénéficiant des aides publiques accordées pour les travaux de nettoyage liés à la reconstitution des peuplements forestiers sinistrés par la tempête Klaus.

Figure 4 **RÉGIME D'ÉCLAIRCIE POUR L'ITINÉRAIRE SYLVICOLE STANDARD DU PIN MARITIME (L2, tableau II) SUR LES LANDES ET LES DUNES ET POUR LES TROIS TYPES DE STATION (LANDE HUMIDE, MÉSOPHILE OU SÈCHE).**

L'itinéraire sylvicole est représenté selon le diamètre dominant (en mètres) en abscisse et la densité relative (Dx) estimée par rapport à une densité maximale viable en ordonnée (Sales Luis et Fonseca, 2004). Les éclaircies sont déclenchées quand la densité relative atteinte est supérieure à la densité relative maximale.



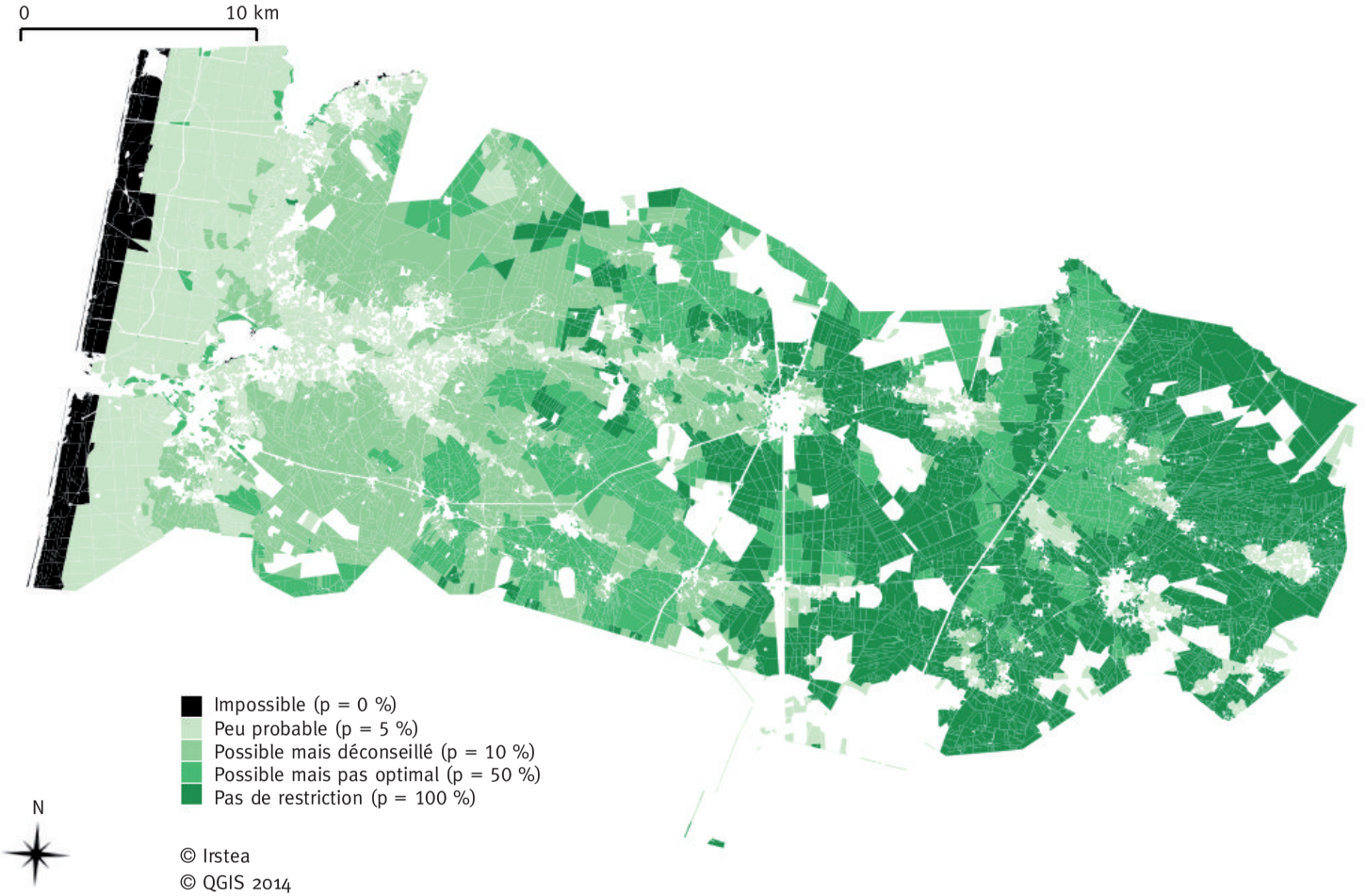


Affectation des itinéraires sylvicoles sur la zone d'étude

Tous les itinéraires sylvicoles ne peuvent pas être menés sur n'importe quelle partie de la zone (figure 1, p. 495). En particulier, il n'est pas pertinent d'affecter des itinéraires à vocation biomasse sur les parcelles les plus pauvres, ou de l'eucalyptus sur des espaces sensibles au gel. Ainsi, trois cartes ont été créées à partir des indices de végétation afin de définir les sites les plus favorables pour les itinéraires de production de biomasse de Pin maritime (figure 5, p. 502) et Eucalyptus, ainsi que l'implantation des parcelles de Robinier. Ces cartes sont représentées sous forme d'une probabilité qui peut varier entre 0 (site non propice à ces itinéraires sylvicoles) et 1 (site très bien adapté à ces itinéraires sylvicoles) lors de l'affectation d'un itinéraire sylvicole donné à une partie du territoire.

Figure 5

CARTE DE LOCALISATION PRÉFÉRENTIELLE POUR LES ITINÉRAIRES SYLVICOLES DE PRODUCTION DE BIOMASSE EN PIN MARITIME DANS LA ZONE D'ÉTUDE DE PONTENX



À partir des enquêtes sur le comportement des propriétaires (Sergent *et al.*, 2013), il est possible de construire une matrice à dire d'expert permettant de définir en fonction de chaque type de propriétaire la surface qu'il va réserver à chacun des itinéraires sylvicoles. Les photographies aériennes après la tempête de 2009 ont permis de réaliser une photo-interprétation de la zone d'étude et d'obtenir une première matrice définissant l'état des lieux de la zone en pourcentage de répartition des itinéraires sylvicoles par catégorie de propriétaires (tableau III, ci-dessous) et qui représente le scénario de référence appelé « Gestion traditionnelle (S0) » (figure 1, p. 495).

Ensuite, pour chacun des scénarios de prospective (Sergent *et al.*, 2014), une nouvelle matrice est construite à dire d'expert en prenant en compte les résultats des entretiens effectués auprès des propriétaires de la zone d'étude (figure 1, p. 495). Par exemple, pour le scénario « Économie verte forestière (S4) » la répartition en surface des types de propriétaires de la zone d'étude est modifiée de la façon suivante : regroupement des propriétés « Traditionnaliste plein-temps-G2A » vers « Entrepreneur forestier-G1A », professionnalisation des propriétaires « Extérieur passif-G3 » vers « Traditionnaliste-G2 », l'essor modéré de préoccupations environnementales « Traditionnaliste-G2 » et « Extérieur passif-G3 » vers « Environnementaliste-G4 », etc. Ces modifications de surface par type de propriétaires sont ensuite croisées avec les itinéraires sylvicoles proposés : apparition et développement d'itinéraires semi-dédiés pour le Pin maritime, développement des plantations de Robinier (figure 6, p. 504).

Tableau III **Relation entre les propriétaires forestiers et les différents itinéraires sylvicoles en 2009 sur la zone de Pontenx. Répartition de référence appelée scénario « Gestion traditionnelle (S0) »**

	Type de propriétaire	G1A	G1B	G2A	G2B	G3	G4	Ensemble de propriétaires
	% de la surface totale	30	13	16	27	12	2	100
Surface relative du type de propriétaire répartie par itinéraires sylvicoles pour le scénario « Gestion traditionnelle (S0) »	I1	3,4	86,6	1,5	14	4,6	72,4	18,17
	I2	91,4	6	89,1	73,4	43,6	0	67,69
	I3	–	–	–	–	–	–	0
	I4	–	–	–	–	–	–	0
	I5a	–	–	–	–	–	–	0
	I5b	–	–	–	–	–	–	0
	I6	0	1,3	0	1,6	30,1	16,7	4,47
	I7	0	0	0	0	0	0	0,02
	I8a	3,6	0	6,7	8,3	16,9	9,4	6,61
	I8b	0,9	6,1	1,3	1,7	3,4	0,9	2,13
	Sans forêt	0,3	0	0,5	0,2	1,1	0,2	0,37
	Autre	0,4	0	0,9	0,9	0,3	0,4	0,55
Ensemble des itinéraires		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Figure 6

DISTRIBUTION, SOUS FORME DE CARTE PROPORTIONNELLE, DE LA SURFACE DES PROPRIÉTAIRES FORESTIERS (définitions fournies au paragraphe "Catégories de propriétaires forestiers-$G_X X$") **PAR ITINÉRAIRES SYLVICOLES (I_X, tableau II) POUR LE SCÉNARIO « ÉCONOMIE VERTE FORESTIÈRE (S4) ».**

Il existe une portion de surface de la zone d'étude qui n'est affectée à aucun des types de propriétaire définis (Autre).

Ces matrices représentées sous forme de tableaux ou de cartes proportionnelles (tableau III, p. 503 ; figure 6, p. 504) sont ensuite utilisées comme base pour les tirages aléatoires stratifiés. Elles permettent de redistribuer pour chaque type de propriétaire les itinéraires sylvicoles sur les parcelles cadastrales au prorata des pourcentages de surfaces ainsi prédéfinis (figure 1, p. 495), en tenant compte des cartes de contraintes stationnelles (figure 5, p. 502).

LES OUTILS ET LES MODÈLES POUR SIMULER L'ÉVOLUTION DE LA DYNAMIQUE FORESTIÈRE

Disposant du fond cadastral anonymisé et de la typologie des propriétaires, l'objectif est de simuler de manière réaliste l'impact des scénarios de prospective grâce aux modèles de croissance sur l'ensemble du parcellaire de la zone d'étude (figure 1, p. 495). Le choix de l'outil de simulation s'est porté sur la plateforme CAPSIS (Dufour-Kowalski *et al.*, 2012) autour de laquelle une large communauté de chercheurs travaille et a implémenté plus de 50 modèles de croissance pour des peuplements forestiers très variés en matière d'essences et de structures. Deux modèles dédiés aux deux espèces principales de production de la zone ont été sélectionnés : le modèle Lemoine (Meredieu *et al.*, 2013) pour le Pin maritime paramétré d'une part pour les peuplements de la dune et d'autre part pour les peuplements des landes, et le modèle Fagacées (Le Moguédec et Dhôte, 2012) pour le Chêne sessile, adapté aux conditions locales de croissance pour le Chêne pédonculé. Ils sont utilisés pour simuler la croissance des peuplements au cours du temps, l'impact des éclaircies et des coupes rases. Les modèles nécessaires pour simuler les itinéraires I5b (biomasse d'Eucalyptus) et I7 (Robinier) n'existant pas pour notre contexte et les surfaces dédiées à ces types d'itinéraires étant très faibles, ces itinéraires ont été alloués de manière arbitraire à l'itinéraire de biomasse de Pin maritime I5a (Landes).

Le métamodule SIMMEM (Cucchi *et al.*, 2011) est quant à lui utilisé pour sa capacité à prendre en compte un parcellaire à l'échelle d'un territoire et à organiser des simulations conjointes en utilisant les modèles de croissance adaptés aux caractéristiques dendrométriques de chaque parcelle. Il a été configuré pour faire évoluer les 17 792 peuplements (unités de gestion supérieures à 0,1 ha) de Pin et de Chêne sur les 101 000 ha de la zone d'étude dans les 60 prochaines années. Dans la zone, des parcelles détruites par la tempête Klaus étaient déboisées en début de période : le module SIMMEM ne pouvant pas gérer des parcelles forestières sans arbres, tous ces peuplements se sont vus affecter l'âge de 1 an et une densité initiale correspondant à l'itinéraire sylvicole de la parcelle (58 000 ha sur 86 000 ha de la surface totale forestière). Les modèles utilisés permettant de simuler l´évolution des peuplements à partir de 12 ans, SIMMEM extrapole de manière linéaire les caractéristiques des peuplements entre 0 et 11 ans sur la base des données simulées à 12 ans et il définit la fréquence de calcul des données selon le pas de temps le plus fort des modèles utilisés (tous les 3 ans). SIMMEM permet de contraindre le volume de récolte annuel pour tenir compte d'une capacité de mobilisation maximale sur la zone simulée. Ainsi, la surface maximale des coupes annuelles a été limitée à 10 % de la surface forestière totale dans tous les scénarios. Enfin, SIMMEM permet de paramétrer une période de jachère entre deux révolutions pour éviter les problèmes d'hylobe (*Hylobius abietis* L.) : un report des plantations de 2 ans après la coupe rase a été choisi.

ÉVOLUTION DE LA DYNAMIQUE FORESTIÈRE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Pour représenter l'évolution de la dynamique forestière de la zone d'étude, plusieurs indicateurs permettant d'évaluer les services écosystémiques et la vulnérabilité des peuplements ont été utilisés.

Indices dendrométriques

Les modèles de croissance associés à chaque peuplement permettent d´obtenir les données dendrométriques que sont l'âge, la hauteur moyenne et dominante, le diamètre moyen et dominant, la densité, la surface terrière, le volume commercial (sur pied et exploité) et la quantité de carbone stocké dans la partie aérienne du peuplement (Fortin *et al.*, 2012), ainsi que des informations sur la gestion comme la date de la dernière éclaircie, ou de la coupe rase.

Indices de vulnérabilité

Des indices de vulnérabilité au vent et au feu ont été spécifiquement créés pour évaluer l'impact des itinéraires sylvicoles sur les risques de tempêtes et d'incendies (Orazio *et al.*, 2015). L'indice de vulnérabilité au vent est d'une part lié à la hauteur moyenne, et d'autre part augmente après chaque éclaircie. En effet, il a été bien documenté que les peuplements sont plus sensibles aux chablis dans les deux années qui suivent une éclaircie (Landmann *et al.*, 2010). L'indice prend en compte également le fait que le risque augmente significativement pour des vitesses critiques de vent ayant des temps de retour inférieurs à la révolution maximale des peuplements. L'indice de vulnérabilité au feu est lié spécifiquement à la densité en nombre de tiges, mais aussi à l'âge du peuplement en années. Le phytovolume par type de sous-bois n'a pas été pris en compte car l'information n'était pas disponible dans les données d'entrée et aucun des modèles choisis ne décrivait cette variable. Nous aurions pu faire l'hypothèse qu'un nettoyage est effectué avant chaque éclaircie comme le recommandent Macé et Laquerre (2010), mais cette pratique n'est pas vérifiée sur le terrain pour tous les itinéraires.

Indices de diversité

Le type de gestion sylvicole impacte directement la biodiversité dans les peuplements. Pour l'évaluer, deux indicateurs ont été calculés : l'indice de biodiversité saproxylique et l'indice de diversité de Shannon (différents couverts forestiers) (Orazio *et al.*, 2015).

L'indice de biodiversité saproxylique est calculé à partir de l'âge des peuplements et de la distance en années depuis la dernière éclaircie de façon à estimer indirectement la quantité de bois mort d'origine anthropique (éclaircies et coupe rase) (Brin *et al.*, 2008). En effet, outre son rôle majeur pour l'habitat d'espèces dites saproxyliques, le bois mort contribue également à la séquestration du carbone et au recyclage des nutriments. C'est à des échelles « paysagères » que les pratiques de gestion favorisant le bois mort doivent être particulièrement appréhendées, afin de prendre en compte la diversité des conditions rencontrées sur la zone d'étude dans son ensemble. La dimension temporelle devrait également être considérée car la continuité de la couverture forestière et la disponibilité de bois mort pourraient jouer un rôle majeur dans la protection de ces insectes (Kraus et Krumm, 2013).

L'indice de Shannon (SHDI) est un estimateur de la diversité à large échelle prenant en compte la richesse (estimée par le nombre de types de forêts présentes) et la régularité (par répartition de la surface relative de chacun de ces types). Néanmoins, la simulation de la zone de Pontenx prend en compte seulement les couverts forestiers pour le calcul de SHDI. Les plantations de pins maritimes ont été divisées en trois catégories différentes : peuplements jeunes (moins de 7 m), classe intermédiaire (de 7 à 15 m) et peuplements âgés (plus de 15 m) (van Halder *et al.*, 2008) afin de mieux saisir leur rôle dans la zone d'étude, en particulier pour l'avifaune. De même, les peuplements de Chêne ont été divisés selon des classes similaires. L'indice de Shannon augmente quand le nombre de ces types augmente ou lorsque la répartition proportionnelle de leur surface devient plus régulière. Pour un nombre donné de peuplements, la valeur maximale de l'indice de Shannon

est atteinte lorsque tous les types de peuplement définis par leur âge et leur composition arborée ont la même surface (Fahrig *et al.*, 2011).

Agrégation des indices au niveau de la zone d'étude

Mis à part l'indice de diversité de couverts forestiers (Shannon), l'ensemble des indicateurs est calculé pour chaque parcelle forestière. Il est donc nécessaire d'agréger les différents indices de différentes manières, soit en faisant une simple somme soit en effectuant des moyennes pondérées sur l'ensemble des peuplements simulés (par hectare et par peuplement).

RÉSULTATS : ÉVOLUTION DES INDICATEURS SELON LES 5 SCÉNARIOS

Évolution des indicateurs sur la période 2009-2069

Plusieurs indicateurs sont calculés lors de la simulation de l'évolution de la zone d'étude afin d'évaluer les services écosystémiques et les risques (figure 7, p. 508). Il est ainsi possible de comparer l'évolution des services écosystémiques sur une période de 30 à 60 ans pour chacun des scénarios. Ces simulations prennent en compte les évolutions de chaque type de propriétaire forestier dans leurs choix d'itinéraires sylvicoles face au contexte socioéconomique tout en intégrant les contraintes du milieu dans l'affectation des itinéraires au parcellaire.

La simulation de la zone de Pontenx utilise un état initial comportant d'importantes zones endommagées par la tempête Klaus en 2009. Ces surfaces ont été replantées dans un délai plutôt court grâce aux subventions de l'État, environ 50 % de la surface totale de la zone de Pontenx (communication GIP ATGERI, 2015). Cette remise à zéro pour une large surface dans la zone d'étude entraîne une homogénéisation des dynamiques de production : un pic de production en 2050, suivi d'une diminution généralisée des ressources de la zone.

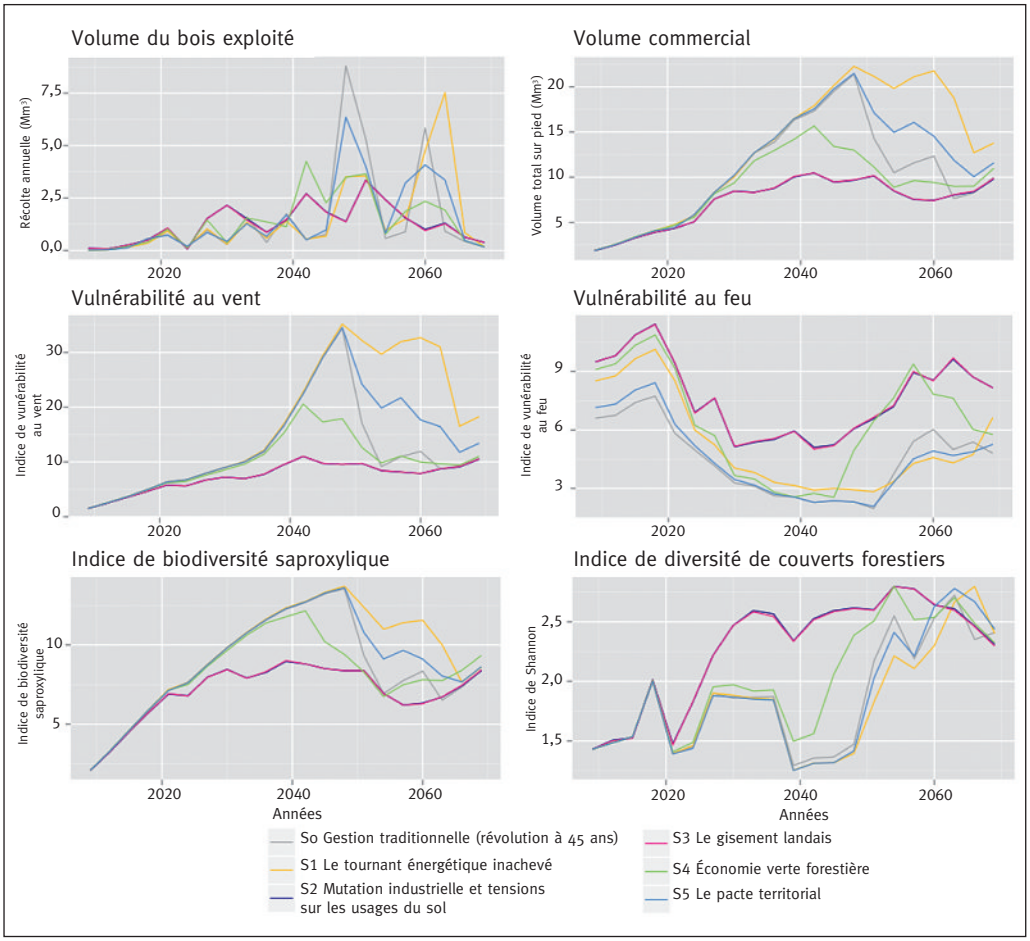
Cette évolution est une représentation théorique dans laquelle les risques forestiers (nouvelle tempête, attaques massive d'insectes, etc.) ne sont pas pris en compte et où les catégories des propriétaires définies par la matrice de répartition ne changent pas d'itinéraires sylvicoles sur toute la durée des simulations.

Dans la figure 7 (p. 508), le volume total sur pied (volume commercial) du scénario « Le tournant énergétique inachevé (S1) » montre deux pics de production en 2048 et en 2060, en raison d'une forte proportion des itinéraires standards Pin maritime I2. Dans le scénario « Mutation industrielle et tensions sur les usages du sol (S2) », les propriétaires sont encouragés à faire plus de coupes rases et à augmenter la part des plantations à courte révolution ; cette tendance est encore accentuée dans le scénario « Gisement landais (S3) », par un comportement très productiviste lié à la demande de biomasse. Le scénario « Économie verte forestière (S4) » se distingue par sa multifonctionnalité, y compris pour le développement de la chimie verte de niche pour le Pin maritime, sans oublier l'augmentation des zones de feuillus. Finalement, le scénario « Le pacte territorial (S5) » reste assez proche du scénario initial « Gestion traditionnelle (S0) », bien que l'action des collectivités, souhaitant développer de nouveaux projets énergétiques, ait un effet tampon sur les volumes sur pied après 2050.

Le carbone séquestré dépend directement des volumes du bois sur pied dans la partie aérienne et ne prend pas en compte le carbone séquestré dans le sol. Dans les scénarios « Mutation industrielle et tensions sur les usages du sol (S2) » et « Gisement landais (S3) », la production de biomasse et les itinéraires à courte révolution vont permettre une récolte de bois plus régulière et de ce fait la séquestration de carbone dans les peuplements va être moins importante que pour

Figure 7 **COMPARAISON DES INDICATEURS ENTRE LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS DE PROSPECTIVE SUR LA ZONE D'ÉTUDE DE PONTENX**

(Les différences entre les scénarios « Mutation industrielle et tensions sur les usages du sol (S2) » et « Gisement landais (S3) » ne sont pas visibles pour ce choix de courbes).



des scénarios qui intègrent des révolutions longues comme « Le tournant énergétique inachevé (S1) » ou « Le pacte territorial (S5) ».

Le volume du bois exploité (récolte annuelle) pendant les 15 premières années est très faible. En effet, beaucoup de zones ont été replantées en 2009 après la tempête et n'offrent que de faibles opportunités de récolte. Tous les scénarios suivent à peu près la même tendance, avec un pic proche de 2050 (lorsque les plantations arrivent à la maturité) et un second dix ans plus tard lié aux révolutions plus longues. Néanmoins, le graphique indique que, selon les choix d'itinéraires sylvicoles qui sont faits, les volumes récoltés peuvent varier de plus de 50 % d'un scénario à l´autre certaines années. Les types d'itinéraires sylvicoles affectant directement le calendrier de récolte de bois, les scénarios qui pratiquent des itinéraires à courte révolution comme celui de

« Mutation industrielle et tensions sur les usages du sol (S2) » ou le « Gisement landais (S3) », vont permettre des récoltes plus régulières, mais avec des volumes moindres.

Les itinéraires à courte révolution appliqués dans les scénarios « Mutation industrielle et tensions sur les usages du sol (S2) » et « Gisement landais (S3) », ne permettent pas aux arbres de pousser très haut et l'absence d'éclaircies réduit la vulnérabilité au vent. En revanche la vulnérabilité au feu est maximale pour ces itinéraires : les peuplements, en général jeunes, présentent une continuité horizontale et verticale et des densités très fortes. Ces types de sylviculture ne prévoient aucun nettoyage ou débroussaillement, ce qui augmente le risque d'incendie. La situation est inversée pour le scénario « Le tournant énergétique inachevé (S1) » et le scénario « Le pacte territorial (S5) », avec un risque de feu faible grâce aux effets des éclaircies sur la densité. Si les peuplements âgés avec des hauteurs importantes brisent la continuité verticale et réduisent le risque de propagation des incendies dans les houppiers, ils font accroître sérieusement la vulnérabilité au vent.

Concernant la biodiversité des espèces saproxyliques, il est évident que les itinéraires à courte révolution engendrent un impact négatif car ils génèrent très peu de bois mort, avec peu ou pas d'éclaircies et des souches de petite taille. Les scénarios avec des révolutions plus longues ne sont pas très favorables non plus : l'indice a tendance à augmenter pendant les trois premières décennies mais il est difficile après le pic de 2048 de garder une diversité de bois mort sur les diamètres et les âges, car tous les peuplements sont rajeunis de manière simultanée. Finalement, le scénario « Économie verte forestière (S4) » est le plus bénéfique pour la biodiversité et la conservation des espèces saproxyliques car la part de surfaces dédiées aux itinéraires feuillus est forte. Par ailleurs, en raison de la diversité des itinéraires appliqués, il existe une forte hétérogénéité des diamètres et des âges (Bouget et Brin, 2009).

Au contraire l'indice de diversité de Shannon va se comporter à l'inverse de l'indicateur de biodiversité saproxylique, notamment pour les scénarios « Mutation industrielle et tensions sur les usages du sol (S2) » et « Gisement landais (S3) », lesquels se distinguent de tous les autres et montrent des courbes intéressantes avec un équilibre non négligeable entre la richesse et la régularité entre les unités de gestion. Les scénarios « Le tournant énergétique inachevé (S1) », « Le pacte territorial (S5) » et « La gestion traditionnelle (S0) » ne font pas augmenter la diversité entre les types de couverture forestière, ces espaces restent majoritairement des peuplements âgés, avec une situation qui change après 2050 grâce à la dynamique des coupes rases et des nouvelles plantations. Le scénario « Économie verte forestière (S4) » connaît cette dynamique une dizaine d'années plus tôt, cependant la variété d'itinéraires sylvicoles appliqués ne permet pas de garder un équilibre entre ces espaces pour favoriser l'indice de biodiversité de Shannon.

CONCLUSIONS

Dans un massif qui semble partiellement homogène à la fois pour ses milieux et ses structures forestières, cette étude révèle que, sans changer d'essences forestières principales, des scénarios prospectifs peuvent faire varier énormément les caractéristiques forestières de ce territoire.

En matière de ressource tout d'abord, la figure 7 (p.508) indique clairement une variation de plus de 50 % du volume commercial sur pied selon le scénario appliqué. Cela correspond à un lissage des volumes exploités avec le cas extrême qu'est le scénario « Gisement landais (S3) » où entre 2030 et 2060 les volumes exploités sont constants, alors que dans la plupart des autres scénarios on observe deux pics en 2048 et 2060. Les contextes qui conduisent à une stratégie d'accumulation de bois sur pied avec ses pics présentent l'avantage de fournir des arbres moyens

plus gros (on passe de 0,4 à 1,3 m^3) et donc avec plus de valeur selon les critères du marché de 2013. Les indices de valeur du bois sur pied sur la zone d'étude peuvent varier d'un facteur 3.

Cependant, il est à noter que ces évolutions des indicateurs de production ont de fortes répercussions sur les autres indices. C'est ainsi que les scénarios qui aboutissent à de longues révolutions à partir d'un état initial de même âge multiplient par 3 les indices de sensibilité au vent et à l'inverse les indices de sensibilité au feu sont divisés par 6. Enfin, l'impact sur la biodiversité des différents scénarios est plus difficile à interpréter selon que l'on s'intéresse à l'indice de biodiversité saproxylique ou à celui de Shannon : pour le premier, on observe une variation de 9 à 14, avec un clair désavantage des itinéraires de type biomasse, alors que pour le second, les situations générant une diversité des classes d'âge lui sont favorables plus rapidement pour ces mêmes itinéraires.

Grâce à la simulation, il est donc possible de voir l'amplitude des changements induits sur un territoire et de prendre conscience que les décisions prises aujourd'hui peuvent faire varier de plus de 50 % la plupart des indicateurs, même en maintenant une espèce dominante et en prenant en compte le comportement partiellement conservateur des différents types de propriétaires.

LIMITES ET PERSPECTIVES

Contrairement à une étude méthodologique qui aurait utilisé un territoire théorique, ce travail a volontairement choisi un territoire forestier français réel touché par un aléa abiotique de grande ampleur, pour lequel les politiques forestières ont un impact immédiat car la propriété forestière y est variée. De plus, cet exemple permet de mettre en évidence les points de blocage à la fois sur les outils disponibles de prévision de ressources pour un territoire pseudospatialisé, la nécessité d'avoir recours à de l'expertise (surface maximale de mobilisation, temps de jachère, modulation de la productivité…) mais également sur la disponibilité des données d'initialisation nécessaires au fonctionnement des modèles de dynamique. Ce travail démontre la valeur ajoutée d'une approche territoriale lors de l'analyse d'indicateurs qui permettent de prendre en considération une grande diversité des fonctions et des services fournis par les forêts, tout en intégrant des contraintes sociales et écologiques. Les valeurs présentées dans cette étude ont pour premier intérêt de pouvoir comparer des scénarios entre eux, l'appréciation de leur valeur absolue nécessiterait un travail de validation au-delà des objectifs du présent article.

La prise en compte d'indices de fertilité permet de moduler la productivité des parcelles de manière réaliste selon les milieux et les pratiques pour toute la zone d'étude. Toutefois, durant les années de simulation, l'indice de fertilité initial attribué a été conservé sans prendre en compte ni les impacts du changement climatique (précipitations, températures) (Bréda *et al.*, 2010) ni les pratiques culturales choisies (amendements répétés, nouveau matériel génétique, exportation forte de biomasse). De plus, si, au cours du temps, les peuplements forestiers sont constitués d'essences plus variées, alors de nouveaux modèles de croissance seraient nécessaires pour simuler toutes les surfaces et il faudrait cesser d'utiliser des modèles génériques. Une autre limite est constituée par l'absence de prise en compte des aléas (incendies, tempêtes et agents pathogènes) pendant la période de simulation car il n'a pas été établi de cartes de probabilités d'occurrence de ces aléas sur la période considérée tenant compte des niveaux de vulnérabilité des peuplements. Enfin, il existe des limites pour l'interprétation des indicateurs eux-mêmes. Par exemple, la quantité de carbone stocké n'est calculée que sur la base des parties aériennes des arbres, négligeant les parties racinaires, le sous-bois et le sol. Un travail spécifique doit être mené pour améliorer le calcul de ces indicateurs en sortie des modèles de croissance ou en proposer de nouveaux compatibles avec les indicateurs de gestion durable des forêts (MAAF et IGN, 2016).

Le travail d'état des lieux initial sera facilité dans le futur grâce à l'acquisition de données sur de larges surfaces (évaluation des productivités par les modèles de surface, évaluation des phytovolumes du sous-bois, évaluation automatique de valeurs dendrométriques, etc.) avec des techniques telles que le lidar ou d'autres capteurs satellites (Bélouard *et al.*, 2015). Sous réserve de posséder une puissance de calcul suffisante, le traitement de massifs entiers (en l'occurrence celui des Landes de Gascogne) est donc techniquement envisageable.

En conclusion, les résultats de ce type d'études contribuent à la réflexion sur la gestion adaptative à tester sur des « mésoespaces » forestiers (ici plus de 80 000 ha), en proposant une méthode de construction originale combinant les comportements de différents groupes de propriétaires soumis à des scénarios socioéconomiques prospectifs, les contraintes environnementales actuelles et des propositions d'itinéraires sylvicoles variés. Reste aux acteurs à s'approprier les résultats pour prendre les décisions de politique forestière qui leur semblent les plus pertinentes.

Christophe ORAZIO – Rebeca CORDERO
Atlantic European Regional Office
of the European Forest Institute
EFIATLANTIC
69 route d'Arcachon
F-33612 CESTAS
(Christophe.Orazio@efi.int)
(Rebeca.Cordero@efi.int)

Baptiste HAUTDIDIER
Irstea
UR ETBX, centre de Bordeaux
50 avenue de Verdun Gazinet
F-33612 CESTAS CEDEX
(Baptiste.Hautdidier@irstea.fr)

Céline MEREDIEU
INRA
UMR1202 BIOGECO
F-33610 CESTAS
et
Université Bordeaux
BIOGECO, UMR 1202
F-33610 CESTAS
(Celine.Meredieu@pierroton.inra.fr)

Patrick VALLET
Irstea
UR écosystèmes forestiers
Domaine des Barres
F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON
(Patrick.Vallet@irstea.fr)

Remerciements

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien financier de l'Union européenne (*via* son 7e programme cadre de recherche et développement : projet INTEGRAL, contrat N° 282887) et au cofinancement des partenaires de l'EFIATLANTIC (région Aquitaine, ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt).

BIBLIOGRAPHIE

BÉLOUARD (T.), PY (N.), MAILLET (G.), GUYON (D.) MEREDIEU (C.), PAUSADER (M.), CHAMPION (N.). — Pinastéréo — Estimation de la hauteur dominante et de la biomasse forestière dans le massif des Landes de Gascogne à partir d'images stéréoscopiques Pléiades. — *Revue française de Photogrammétrie et de Télédétection,* 209, 2015, pp. 133-139.

BOUGET (C.), BRIN (A.). — Bois mort et biodiversité saproxylique à différentes échelles spatiales. — *Rendez-vous techniques,* n° 25-26, 2009**,** pp. 26-33.

BRÉDA (N.), BOSC (A.), BADEAU (V.). — Éléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine. pp. 225-236. *In* : Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Livre vert du projet CLIMATOR. — Angers : ADEME, 2010.

BRIN (A.), MEREDIEU (C.), PIOU (D.), BRUSTEL (H.), JACTEL (H.). — Changes in quantitative patterns of dead wood in maritime pine plantations over time. — *Forest Ecology and Management,* 256, 2008**,** pp. 913-921.

CHAPERON (H.). — La Culture du Pin maritime en Aquitaine. — Paris : Association Forêt-Cellulose (AFOCEL), 1986. — 231 p.

COLIN (A.), MEREDIEU (C.), LABBÉ (T.), BÉLOUARD (T.). — Étude rétrospective et mise à jour de la ressource en pin maritime du massif des Landes de Gascogne après la tempête Klaus du 24 janvier 2009. — Inventaire forestier national (IFN), 2010. — 39 p.

CRPF AQUITAINE. — État des connaissances techniques pour le Massif des Landes de Gascogne. — Bordeaux : CRPF Aquitaine, 2015. – 89 p.

CRPF AQUITAINE. — Schéma Régional de Gestion Sylvicole des Forêts Privées d'Aquitaine. — Bordeaux : CRPF Aquitaine, 2006. — 70 p.

CRPF AQUITAINE. — Tempête du 24 janvier 2009 : éléments de réflexions pour aborder la reconstitution forestière du Massif des Landes de Gascogne. — Bordeaux : CRPF Aquitaine, 2009. — 134 p.

CRPF AQUITAINE, ONF. — Fiches techniques d'aide aux sylviculteurs sinistrés par la tempête Klaus de janvier 2009. La clause de diversification dans la reconstitution après-tempête. — 2011. — 2 p.

CUCCHI (V.), DE COLIGNY (F.), CORDONNIER (T.), VALLET (P.). — SIMMEM simulateur multi-modules pour l'échelle massif. Projet ANR Forgeco. — 2011. — 26 p. [En ligne] disponible sur : http://capsis.cirad.fr/capsis/help/simmem.

DUFOUR-KOWALSKI (S.), COURBAUD (B.), DREYFUS (P.), MEREDIEU (C.), DE COLIGNY (F.). — Capsis : an open software framework and community for forest growth modelling. — *Annals of Forest Science,* 69, 2012, pp. 221-233.

FAHRIG (L.), BAUDRY (J.), BROTONS (L.), BUREL (F.G.), CRIST (T.O.), FULLER (R.J.), SIRAMI (C.), SIRIWARDENA (G.M.), MARTIN (J.-L.). — Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes : Heterogeneity and biodiversity. — *Ecology Letters,* 14, 2011, pp. 101-112.

FORTIN (M.), NINGRE (F.), ROBERT (N.), MOTHE (F.). — Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain : A case study applied to even-aged oak stands in France. — *Forest Ecology and Management,* 279, 2012, pp. 176-188.

GIP ECOFOR. — Expertise collective scientifique et technique à visée prospective sur l'avenir du massif forestier landais. — 2011. [En ligne] disponible sur : http://landes.gip-ecofor.org/index.php.

HINTERSEER (T.), KOULELIS (P.), JONSSON (R.), MCDERMOTT (C.L.), SALLNÄS (O.), SCHRÖTER (W.), SCHÜLL (E.), SCHWINGSMEHL (M.), SOTIROV (M.), BARRON (D.), KUBO (K.) — Synthesis Report on Integrated Forest Management Scenarios in Europe including the National Case Study Reports and the Report on the Role of EU Commodity Consumption. — 2014. — 93 p. [En ligne] disponible sur : http://www.integral-project.eu/images/Documents/Publications/Deliverables/D3.3.pdf.

IGN. — Un nouveau cadre géographique de référence pour les forestiers français : Les sylvoécorégions (SER). — 2011. [En ligne] disponible sur : http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php ? rubrique 211.

KRAUS (D.), KRUMM (F.). — Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity. — European Forest Institute, 2013. — 284 p.

LANDMANN (G.), DANJON (F.), BRUNET (Y.), MEREDIEU (C.). — Expertise collective scientifique et technique à visée prospective sur l'avenir du massif forestier landais. Critère C1 : Vulnérabilité aux tempêtes. — GIP Ecofor ; INRA, 2010. — 22 p.

LE MOGUÉDEC (G.), DHÔTE (J.-F.). — Fagacées : a tree-centered growth and yield model for sessile oak (*Quercus petraea* L.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). — *Annals of Forest Science,* 69, 2012, pp. 257-269.

MACÉ (P.), LAQUERRE (M.). — Expertise collective scientifique et technique à visée prospective sur l'avenir du massif forestier landais. Critère C3 : Risque incendie de forêt. — DFCI, 2010. — 4 p.

MAAF, IGN. — Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines. Édition 2015. — 2016. — 343 p.

MEREDIEU (C.), LABBÉ (T.), LEMOINE (B.). — Module Lemoine [CAPSIS]. Modèle de croissance pour les peuplements de Pin maritime de type "peuplement". — 2013. [En ligne] disponible sur : http://prodinra.inra.fr/record/255687.

ORAZIO (C.), CORDERO (R.), VALLET (P.), MEREDIEU (C.), HAUTDIDIER (B.), SERGENT (A.), DEUFFIC (P.), BANOS (V.). — Maritime pine forest landscape evolution from 2009 to 2060 according to various political scenarios and forest land owner behaviour : assessment of ecosystem services and vulnerability. — INTEGRAL WP2 Activity report of the French case study : Pontenx. — 2015. — 92 p.

POISSONNET (M.), ORAZIO (C.), CARNUS (J.-M.). — Un réseau de zones pilotes pour la gestion durable des forêts de l'Arc Atlantique. Projet FORSEE. 2007. — 127 p.

RAFFIN (A.), ALAZARD (P.). — *Les cahiers de la reconstitution du GIS GPMF*. n° 4 Matériel végétal de reboisement. — 2014. — 20 p.

SALES LUIS (J.F.), FONSECA (T.F.). — The allometric model in the stand density management of *Pinus pinaster* Ait. in Portugal. — *Annals of Forest Science,* 61, 2004, pp. 807-814.

SERGENT (A.), DEUFFIC (P.), HAUTDIDIER (B.). — WP 3.2 INTEGRAL National Case Study Reports, France. Case Study Area, Pontenx. — 2014 [En ligne] disponible sur : https://forestwiki.jrc.ec.europa.eu/integral/index.php/Pontenx.

SERGENT (A.), DEUFFIC (P.), HAUTDIDIER (B.), MAINDRAULT (M.) — An overview of the factors influencing forest management in the 'Pontenx' case study, France. — 2013. — 125 p. [En ligne] disponible sur : http://www.efiatlantic.efi.int/files/attachments/efiatlantic/research/integral_wp3_1_csr.pdf.

VALLET (P.), BRONNER (T.), DE COLIGNY (F.), PERRET (S.). — Création d'une représentation initiale du territoire en entrée du module SIMMEM. — *Journées couplées CAQ16 — CAPSIS15*. Prénovel, 08-10 avril 2013.

VAN HALDER (I.), BARBARO (L.), CORCKET (E.), JACTEL (H.). — Importance of semi-natural habitats for the conservation of butterfly communities in landscapes dominated by pine plantations. — *Biodiversity and Conservation,* 17, 2008, pp. 1149-1169.

YAUSCHEW-RAGUENES (N.). — Dynamique saisonnière de la végétation forestière (arbres et sous-bois) dans le massif des Landes. Application de la télédétection optique au suivi des hétérogénéités à l'échelle régionale. — Université Bordeaux I, 2012. — 331 p.

SIMULATION DE L'ÉVOLUTION DE LA DYNAMIQUE FORESTIÈRE DANS LES LANDES DE GASCOGNE SOUS DIFFÉRENTS SCÉNARIOS SOCIOÉCONOMIQUES (Résumé)

L'objectif de cette étude est d'illustrer à l'aide d'indicateurs les conséquences de choix de gestion imposés par cinq scénarios socioéconomiques prospectifs appliqués à une large zone forestière pour les 60 prochaines années. Le cas d'étude choisi est la zone centrée sur la commune de Pontenx-les-Forges dans le sud-ouest de la France et couvrant 101000 hectares. Cet article présente une description de la zone d'étude et des itinéraires sylvicoles mis en œuvre par les propriétaires forestiers selon des scénarios. À l'aide d'un simulateur pilotant deux modèles de croissance, l'évolution de la zone d'étude à l'échelle de chaque parcelle est synthétisée par 9 indicateurs sur une période de 60 ans : le volume sur pied, le carbone sur pied, le volume total exploité, la valeur commerciale sur pied, le volume de l'arbre moyen, la vulnérabilité au vent et au feu, et des indices de biodiversité. Un des principaux résultats de cette étude est de montrer l'amplitude des changements pour la production et le volume sur pied : selon les scénarios les récoltes annuelles peuvent varier de 50 % dès 2030. Par conséquent, d'autres indicateurs sont impactés comme la biodiversité, la vulnérabilité au vent ou au feu. Pourtant, l'espèce dominante est maintenue et le comportement partiellement conservateur des types de propriétaires est pris en compte. En conclusion, des améliorations pour de futures simulations sont envisagées ; dans ce but, des synergies avec la télédétection sont nécessaires pour la collecte des données d'initialisation sur de larges territoires, ce qui permettra d'améliorer la précision des résultats.

SIMULATION OF DEVELOPMENTS IN FOREST DYNAMICS IN THE LANDES REGION ACCORDING TO VARIOUS SOCIOECONOMICS SCENARIOS (Abstract)

The main aim of this paper is to illustrate, using a large set of indicators, the consequences of management choices imposed under five socio-economic forward-looking scenarios within a given case study area during the next 60 years. This 101,000 ha case study area is centred around the village of Pontenx-les-Forges in south west France. This paper details this INTEGRAL project case study area and some forest management schemes implemented by forest owners under various scenarios. Using a landscape simulator handling two forest growth models, the evolution of all forest stands in the landscape is simulated using 9 indicators over a 60-year period: growing stock, harvested volume, carbon sequestered in trees, mean tree volume, commercial value of growing stock, susceptibility to wind and fire and biodiversity indexes. One of the main results of this study was to show up the magnitude of effects on growing stock and harvested volumes: according to the scenarios, annual harvesting could vary by 50% as from 2030. As a consequence, other indicators are impacted, such as biodiversity, wind and fire susceptibility. All these changes are observed despite the fact that the dominant species remain the same and that forest owners are considered not very prone to changing their behaviour. In conclusion, options for future improvement are discussed and the opportunities offered by high definition data acquisition from remote sensing are considered.