

Impacts des changements globaux sur la gestion forestière

1. Situation

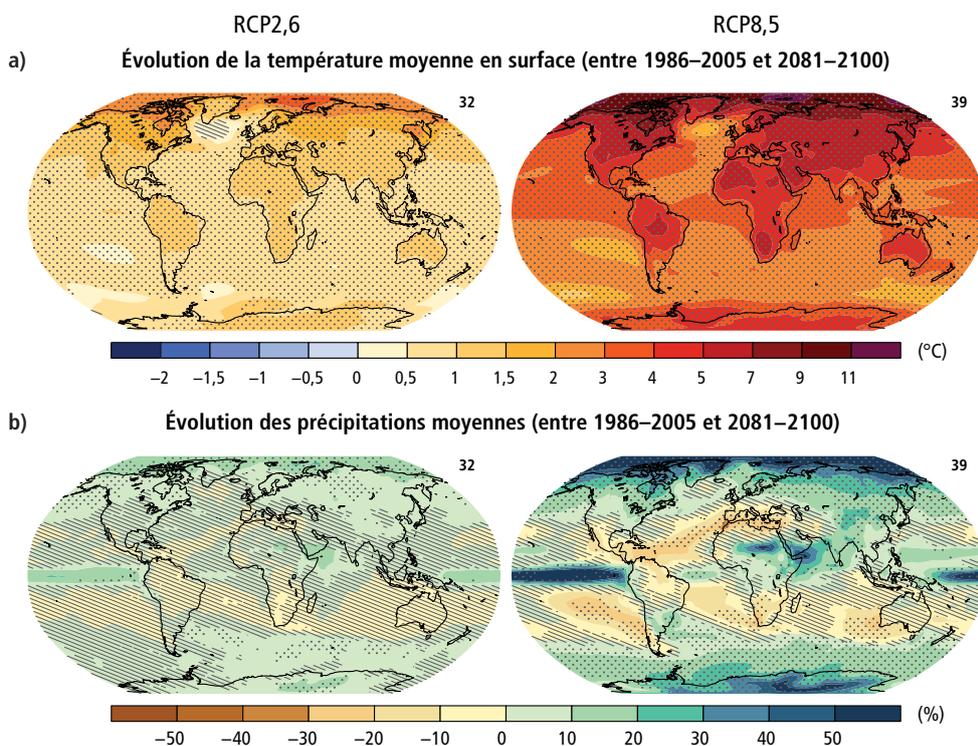
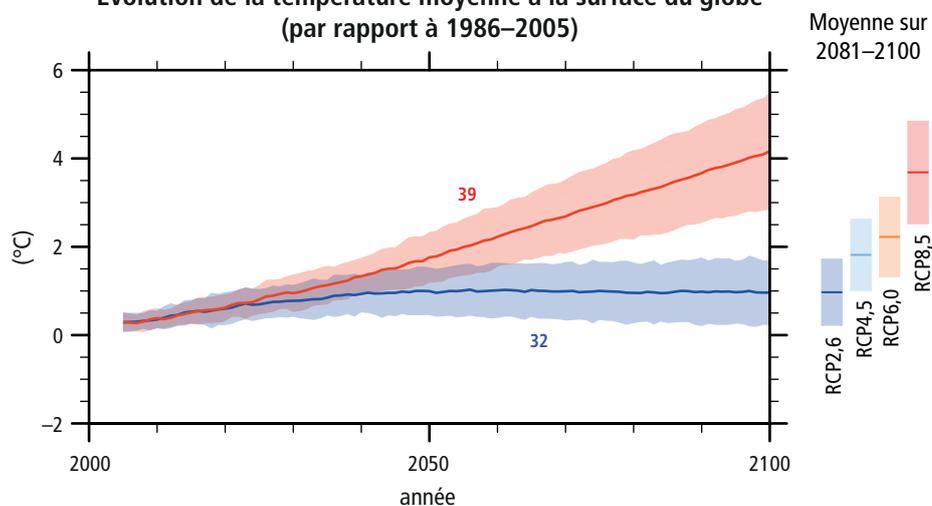
A l'échelle de la planète

Grâce à une très forte mobilisation scientifique, le GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat) a publié de nombreux rapports sur les changements climatiques. Le constat est sans appel : la température moyenne à la surface du globe a augmenté et continuera à le faire avec une vitesse qui pourrait être très grande. Les conséquences sont multiples et d'importance.

Afin d'aider les décideurs, le GIEC a bâti plusieurs scénarios (RCP2.6, ... RCP8.5) sur les évolutions possibles du climat en fonction de notre comportement (voir figure ci-contre). Ils reposent sur différents seuils de forçage radiatif¹ selon les scénarios retenus (GIEC, 2014).

La figure ci-dessous montre que les conséquences ne sont pas uniformes sur l'ensemble de notre planète. En France l'augmentation prévue des température est de l'ordre de 2 à 4 °C.

Évolution de la température moyenne à la surface du globe (par rapport à 1986–2005)



Évolution des températures moyennes de surface et des précipitations selon 2 scénarios (GIEC, 2014).

¹ forçage radiatif : différence entre l'énergie reçue et celle émise par le système climatique planétaire.

La notion de changements globaux² a le mérite d'être plus large que celle de réchauffement climatique. Elle rappelle qu'au-delà de l'augmentation de température, ils se traduisent par une modification du régime des précipitations et de la fréquence des vents violents, vont agir sur la composition spécifique des écosystèmes qu'ils soient forestiers ou non, et en particulier sur la répartition des pathogènes ou sur l'expansion des espèces exotiques. Elle rappelle également la complexité des interactions entre espèces, milieux et activités humaines, que nos actions ont des conséquences à des échelles de temps et d'espace qui peuvent être assez grandes.

Les forestiers du XIXe ont fait un énorme travail de restauration des terrains en montagne (RTM). Ils étaient persuadés d'arriver à maîtriser les aléas tels que l'érosion, les chutes de pierres, les crues torrentielles ou les avalanches. Ils ont au passage oublié les conséquences sociales de leurs interventions (Kalaora et Savoye, 1984, 1989). Ils ne s'attendaient pas non plus à ce qu'un siècle et demi plus tard, leurs actions entraînent une incision de tous les affluents du Rhône à cause d'une trop forte rétention des apports sédimentaires (Liébault, 2003).

Il est malheureusement assez facile de suivre l'évolution de ces changements globaux.

- La liste des phénomènes à large amplitude médiatique ne cesse de s'allonger : retrait des glaciers, diminution de l'épaisseur de la banquise, élévation globale du niveau de la mer, plus grand feu de tourbe en aout 2017 en arctique, fréquence des cyclones de classe 5, etc.

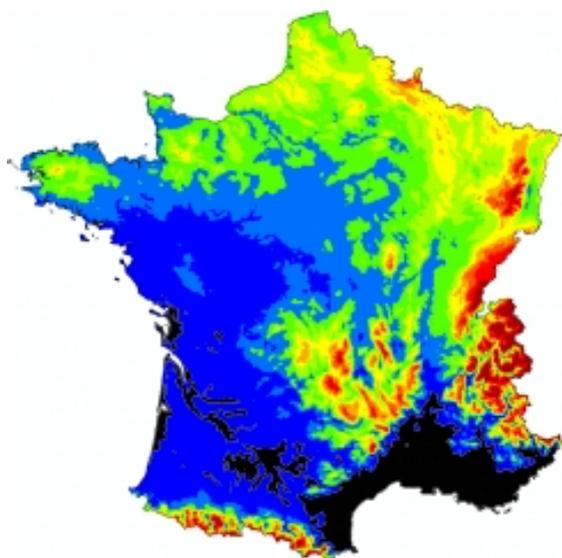
- Ubyrisk Consultants, cabinet d'étude spécialisé dans l'étude des risques naturels et gestionnaire de la base de données Catnat chargée d'enregistrer les événements dommageables d'origine naturelle survenant dans le monde (<http://www.catnat.net>) indique dans son bilan 2015 que sur les 15 dernières années le nombre d'événements s'est accru en moyenne de 2 % par an dans le monde, et que la décennie 2005-2015 est de loin celle qui aura connu le plus grand nombre d'événements.

A l'échelle des écosystèmes forestiers français

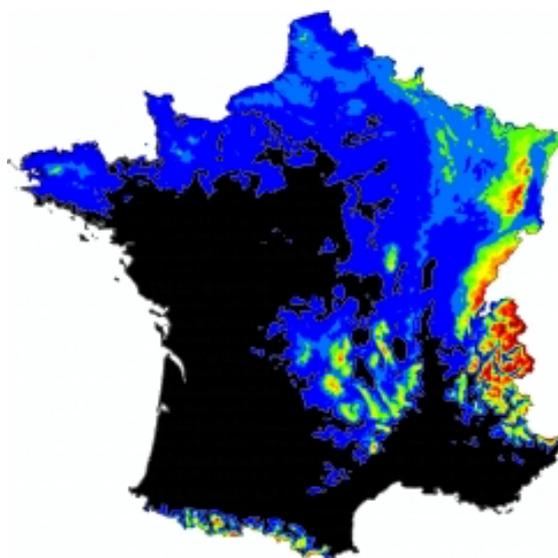
Les écosystèmes forestiers, partie prenante de notre planète et de son fonctionnement sont forcément impactés par ces changements globaux. Ainsi, dès le début des années 1980, Michel Becker, grâce à la dendrochronologie attirait l'attention des scientifiques et des gestionnaires sur l'augmentation de l'accroissement en diamètre des arbres (Becker et al., 1994 ; Badeau et al, 1996, Bontemps, 2005). Que l'augmentation de la productivité des forêts de la métropole française soit uniquement due aux changements climatiques, ou pour une part plus ou moins grande à la pollution atmosphérique sous forme de dépôts azotés n'a que peu d'importance. Ces perturbations globales modifient la répartition des espèces animales ou végétales.

Cartes des probabilités de présence des arbres

En 2004, l'INRA a publié des cartes de répartition probable à l'horizon de 2100 des principales essences arborées. Malgré les limites inhérentes à la conception des modèles et aux incertitudes sur les climats futurs, elles ont été un véritable déclencheur et ont permis d'accorder toute l'importance nécessaire à ce défi. Pour les deux cartes ci-après, l'importance du hêtre diminue depuis le rouge vers le bleu. Le noir correspond à l'absence.



Carte de répartition du hêtre en 2000



Carte de répartition probable du hêtre en 2100

² Traduction de l'anglais global change. Proposé à l'origine comme alternative à l'expression global warming.

Tout en leur gardant un rôle de signal d'alerte, il est important de noter que dans toutes les cartes de ce type, la variabilité génétique des différentes espèces n'est que très peu prise en compte. Elles n'intègrent pas le microclimat liés à la topographie. Par exemple elles n'indiquent pas la présence du hêtre dans les massifs de la Sainte-Beaume ou de la Sainte-Victoire. Elles ne reflètent pas non plus la dynamique assez forte du hêtre dans le sous-étage des forêts méditerranéennes, en particulier dans l'étage climatique du méso-méditerranéen, lorsque le couvert se ferme.

Ces cartes permettent avant tout de mieux comprendre la répartition actuelle des espèces d'arbres et d'anticiper l'augmentation future des taux de dépérissement. Entre 2002 et 2006, dans les pays de Savoie l'épicéa a été soumis à une forte attaque de scolytes générant une perte pour les producteurs et la filière d'environ 1,5 millions de m³. L'analyse de ce phénomène a montré que c'était essentiellement sous la limite altitude naturelle de cette essence que les dépérissements ont été les plus forts. Cet épisode a donc sanctionné l'utilisation de cette essence en dehors de son aire naturelle. L'épicéa n'est pas la seule essence à avoir été utilisée de manière risquée, chênes sessile et pédonculé en France ont également été fortement influencés par l'homme.

Malgré les réserves précédentes ces cartes restent utiles en tant qu'éléments de réflexion. Elles prédisent que vers 2100, les montagnes et en particulier les Vosges deviendraient des zones refuges pour le hêtre. Depuis de nombreuses études ont confirmé la migration des espèces vers des latitudes et des altitudes plus élevées (Lenoir et al., 2008, nombreuses publications du Lerfob³). Ces cartes justifient l'importance accordée aux corridors écologiques (cf travail réalisé au PNRVN). Les massifs forestiers découpés en domaines relativement petits pour des raisons géographiques, climatiques ou humaines, seront d'autant plus vulnérables.

Impacts sur la répartition des fonctions

Les perturbations liées aux changements globaux, qu'elles soient diffuses ou violentes ont une influence sur la fonction de production de bois, sur la rentabilité économique des forêts, les besoins en bois de la filière, la pertinence de certains documents techniques (guides de sylviculture, catalogue de station, aménagement ou Plan Simple de Gestion). Elles invitent certains acteurs d'un territoire à proposer des modifications dans son occupation, avec par exemple une part plus grande à donner à l'agroforesterie.

Bien que le rôle de la forêt en matière de protection des biens et des personnes soit reconnu de longue date, les altérations de cette fonction⁴, ne seront pas abordées alors que les changements climatiques ont par exemple une influence sur la stabilité des versants naturels (Cherkaoui, 2014). Le présent papier se concentrera sur les risques liés à la production de bois, surtout dans les forêts où c'est l'objectif principal, car paradoxalement ils sont moins bien connus. Dans ce papier, l'impact du réchauffement climatique sur le comportement⁵ des propriétaires forestiers face aux risques ne sera pas développé, contrairement aux recommandations de gestion qui devrait permette de les réduire.

A l'échelle des forêts de production

Même si à titre individuel les inquiétudes sur l'impact des changements globaux sur les flux migratoires des populations humaines, les modifications d'utilisation des sols, la perte de biodiversité, l'augmentation des risques sanitaires, etc., sont légitimes, pour un professionnel de la forêt leur gravité ne peut faire disparaître le besoin de se préoccuper de l'impact des changements globaux sur la fonction de production, pour une majorité de forêts dont il a la charge, à une échelle spatiale et temporelle plus faible.

De nombreux risques sont inhérents à la production forestière. Durant le XIXe siècle en Allemagne, l'augmentation de l'instabilité des peuplements face aux aléas climatiques ou biotiques liée à la mise en œuvre de la futaie régulière a conduit à l'émergence de la futaie irrégulière au début du XXe. Les changements globaux de la fin du XXe et au début du XXIe siècle vont avoir un impact sur la production, par le biais de l'augmentation des dépérissements, des chablis, de la baisse ou de l'augmentation de l'accroissement en diamètre.

³ UMR AgroParisTech - INRA

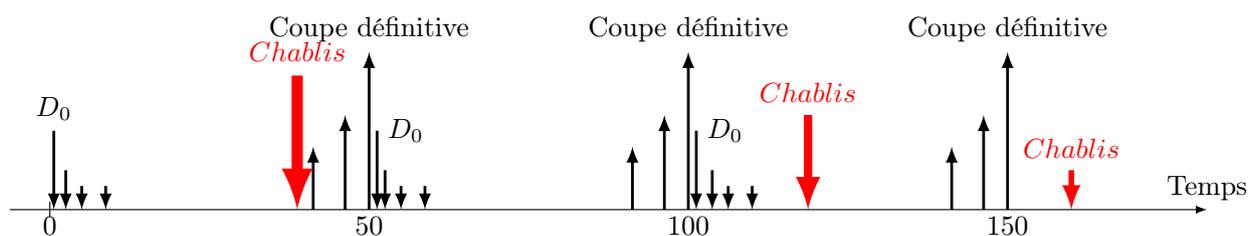
⁴ La migration des résineux en altitude devrait être favorable à leur fonction paravalanche pour les départs qui ont lieu au-dessus de la limite actuelle de végétation. L'augmentation de la part de feuillus dans l'étage actuel des résineux peut être moins favorable.

⁵ Une enquête réalisée en 2012 sur les propriétaires d'Aquitaine ayant plus d'un hectare de forêt (Agreste, 2014) montre que :
- seuls 67% des propriétaires ont une responsabilité civile ;
- 13% ont en plus de la responsabilité civile une assurance contre la tempête ou l'incendie, la moitié optant pour un contrat global (tempête et incendie).
Les propriétaires forestiers d'Aquitaine sont parmi les producteurs forestiers français, les plus sensibilisés au besoin d'assurance.

La gestion forestière doit contribuer au bon fonctionnement de l'écosystème et donc réserver une part de la production pour alimenter les cycles naturels de décomposition, sous forme de portions de forêts laissées en libre évolution ou bien de bois morts au sol ou sur pied dans les parties gérées. Avec les changements globaux, les inquiétudes portent sur la maîtrise de cette seconde part. Toute perte de production affectée à la fonction économie n'est jamais satisfaisante, mais selon les objectifs que l'on fixe à la forêt, son impact sera plus facilement acceptable. Ainsi dans le traitement irrégulier, indépendamment de tout changement climatique, le producteur accepte de perdre un peu de la production globale car il veut avant tout maximiser la production en volume de qualité, or il n'est pas possible de maximiser en même temps la production globale d'un peuplement et celle individuelle des arbres qui la compose⁶.

Parmi les différents risques que doit classiquement intégrer le producteur forestier, celui lié à la volatilité des cours du bois est le plus fréquent. Affectant la rentabilité économique, il peut être rangé dans la catégorie des risques liés à la production de même que le dépérissement de l'arbre ou l'altération de la qualité interne de son bois. En plus de ce risque, le gestionnaire forestier doit normalement intégrer dans sa planification, ceux liés aux grandes perturbations. Or les changements globaux vont non seulement augmenter l'impact de ces dernières, mais aussi le nombre de micro-perturbations, les dépérissements diffus pouvant être rangés dans cette catégorie. Ces différents risques peuvent être liés : les grandes perturbations ont par exemple un impact sur les cours du bois.

La figure ci-après pourrait s'appliquer au cas du douglas géré en futaie régulière avec un âge d'exploitabilité de 50 ans. Elle schématise l'apparition de possibles grandes perturbations qui viennent modifier les flux financiers : les flèches vers le bas correspondent à des dépenses, celles vers le haut à des recettes, les frais fixes annuels ne sont pas représentés. L'importance des dégâts schématisée par la longueur des flèches rouges sera fonction de l'intensité de l'aléa et de la vulnérabilité des peuplements, elle même fonction du stade de développement, principalement la hauteur du peuplement dans le cas de la futaie régulière.



Face à ce constat, préconiser une réduction des âges d'exploitabilité c'est oublier que cela conduit à des dépenses plus fréquentes, diminue les recettes car une sylviculture de futaie régulière même si elle est basée sur des éclaircies fortes ne permettra pas, sauf perte importante de production globale, d'accélérer la croissance en diamètre pour les raisons évoquées précédemment. De plus réduire les âges d'exploitabilité entraîne une perte de la valeur de sauvegarde⁷.

Alors que de tous temps les dommages liés au vent, aux bris de neige ou de glace, aux attaques parasitaires étaient subis, ils n'étaient pas intégrés par les anciennes méthodes d'aménagement forestier que sont celles par affectation, celle du groupe strict ni même par celle du groupe élargi⁸. Pour toutes ces méthodes basées sur le contrôle des surfaces régénérées, le calcul de l'effort de régénération est fait sans tenir compte de l'ensemble de ces perturbations qui compromettent la rentabilité économique, mais surtout le respect du principe de la recherche de l'équilibre des surfaces par classe d'âge qui constitue le moteur de ces méthodes. Au-delà d'un seuil d'intensité et de fréquence des grandes perturbations, les méthodes d'aménagement en futaie régulière perdront leur logique interne. En revanche en montagne, l'existence de chablis réguliers a conduit très tôt à opter pour la résilience du traitement jardiné et à intégrer ce risque lié au vent dans le calcul de la possibilité volume.

⁶ L'effet de la concurrence entre tiges sur la croissance en diamètre n'est pas un phénomène linéaire mais fonctionne par effet de seuil. L'augmentation de la croissance en diamètre des arbres dominants n'a lieu que lorsque la production totale du peuplement commence à baisser. Ce constat est utilisé par la futaie irrégulière pour rechercher le volume sur pied idéal lorsque la fonction principale est celle de la production de valeur.

⁷ Valeur de sauvetage ou de sauvegarde : valeur marchande résiduelle d'arbres ou de peuplements qui ont subi un préjudice (incendie, tempête, ...). Après des fortes perturbations le marché du bois est saturé. Les gros bois de qualité trouvent preneurs, les petits non. La valeur de sauvegarde augmente avec le diamètre et la qualité. Les chênes ont une valeur de sauvegarde supérieure au hêtre.

⁸ Ce sont 3 méthodes d'aménagement de futaie régulière. Elles reposent sur la recherche de l'équilibre des surfaces par classe d'âge. Le calcul de l'effort de régénération constitue une étape clé dans la mise en œuvre de ces 3 méthodes.

2. Terminologie

Avant d'aller plus loin, il est important de préciser certains termes.

2.1. Rappels

Une simple revue bibliographique permet de constater la diversité des concepts, due à la variété des besoins (Cemagref et al., 2000). Elle est utilisée pour l'ensemble des risques naturels mais peut être étendue aux risques de production.

Par définition, un risque résulte du croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité.

Un aléa se définit comme la probabilité qu'un phénomène naturel d'une intensité donnée ait lieu. Il est donc déterminé par une occurrence et une intensité. Il est parfois aussi nécessaire de faire la distinction entre aléa subi et induit⁹. La vulnérabilité traduit les conséquences d'un phénomène. Elle est fonction de deux éléments, les enjeux et les parades.

Dans le domaine des chutes de pierre, l'intensité de l'aléa subi peut être mesurée par l'énergie et par la hauteur du bloc au moment où il atteint le ou les enjeux. L'occurrence de l'aléa subi est le produit de la probabilité d'atteindre un enjeu (obtenue assez précisément en fonction des traitements sylvicoles à l'aide de modèles de trajectographie) par celle de départ d'un bloc d'une falaise (aléa induit) en revanche mal connue.

En matière de chablis, l'aléa induit peut être augmenté par une mauvaise gestion des lisières qui aura comme conséquence une modification de la circulation de l'air. L'existence d'une éclaircie récente, mais aussi le fait d'avoir trop prélevé d'arbres stabilisateurs va augmenter à la fois l'aléa induit mais aussi la vulnérabilité du peuplement pendant quelques années.

Bien souvent les enjeux correspondent aux biens et aux personnes affectés par le phénomène. Par exemple dans le cas des incendies, la forêt devrait être considérée comme un patrimoine naturel à protéger. En pratique, la protection des personnes ainsi que leurs biens, range au second plan la valeur patrimoniale des forêts.

Les parades comprennent tous les moyens de prévention (y compris les traitements sylvicoles), d'équipement et de lutte qui permettent de réduire les dommages produits par le phénomène. L'assurance pourrait (peut) également être rangée dans cette catégorie.

La lutte active s'attaque à la source du problème et tente de le résoudre ou à défaut de le diminuer. En matière d'incendie, le débroussaillage mais aussi la sylviculture doivent être considérés comme de la lutte active. Pour le changement climatique, la lutte active consiste à diminuer la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère par exemple par réduction des émissions nettes. Dans le contexte des changements globaux, le terme souvent employé est celui **d'atténuation**.

Les solutions imaginées sont nombreuses : développement des énergies renouvelables, techniques de géo-ingénierie du stockage du carbone, utilisation de matériaux à faible empreinte carbone, etc. Le problème avec l'aléa teneur en CO₂ de l'atmosphère, c'est que l'atténuation ne peut se concevoir qu'à grande échelle. La forêt peut apporter sa contribution, y compris à une échelle locale, par exemple en cas de ralentissement de la déforestation, ou d'augmentation du volume moyen à l'hectare. La solution proposée de stocker plus de carbone en rajeunissant la forêt repose sur le fait que le maximum de l'accroissement courant en volume d'un peuplement arrive assez tôt. Cette question de l'optimum de la production matière a déjà été débattue au XVIII^e siècle entre Buffon et Varenne de Fenilles. Ce dernier a démontré qu'il fallait non pas retenir le maximum de l'accroissement courant mais celui de l'accroissement moyen, que ce dernier intervenait plus tard, et qu'une réponse plus complète obligeait à se poser la question de la finalité de la production. Si la forêt est vue comme une source d'alimentation d'une filière bois, l'âge d'exploitabilité doit être celui de l'accroissement moyen. Si la forêt est vue comme une source de revenu pour le propriétaire, l'âge d'exploitabilité doit intervenir plus tard. La même démarche appliquée au cas du stockage du carbone obligera à s'intéresser à la durée de vie des produits ce qui conduira à retarder encore l'âge d'exploitabilité. Stephenson (2014) arrive à la même recommandation, même s'il a tendance à confondre les échelles arbre et peuplement.

La lutte passive consiste à réduire les conséquences du phénomène. Le terme souvent employé dans le contexte des changements globaux est celui **d'adaptation**. En matière d'incendie, la lutte passive comprend les pare-combustible, les moyens de lutte (les pompiers, les forestiers). En matière de chablis, l'utilisation d'essences ayant

⁹ Une estimation correcte des probabilités de perte des biens (aléa subi) est requise pour les assurances. De la même façon, une bonne estimation du risque induit permettrait d'établir des assurances en responsabilité civile.

une meilleure valeur de sauvegarde peut être rangée dans la lutte passive. Dans le cadre des changements globaux, les trames vertes et bleues, les corridors intra-forestiers sont des modalités possibles de lutte passive. Gérer les forêts de manière à en améliorer la plasticité économique et la résilience écologique pourrait être un objectif applicable à une échelle locale.

Lutte active ou passive doivent être menées de front. La lutte active est en théorie préférable car elle profite à tous, mais elle peut être illusoire ou incertaine. De par sa nature, la lutte passive vise à protéger des intérêts privés. Dans le cas des changements globaux la sommation de tous ces intérêts privés prend cependant une dimension publique. Les stratégies d'adaptation ont comme avantage de pouvoir être mises en œuvre plus rapidement que celles d'atténuation.

La terminologie présentée ci-avant permet de relativiser certains débats comme par exemple ceux concernant l'augmentation des phénomènes extrêmes¹⁰. La forêt française augmente en surface et en volume. A vitesse de vent comparable, il est logique que les dégâts augmentent en valeur absolue ou relative. Il n'est donc pas nécessaire que la fréquence de l'aléa augmente pour que le problème devienne de plus en plus préoccupant car la vulnérabilité s'est accrue. La terminologie doit servir de filtre de lecture des très nombreux articles qui sortent quotidiennement. Elle permet de séparer les études qui cherchent à améliorer la connaissance de l'aléa ou de la vulnérabilité de celles qui proposent des alternatives de gestion. Refuser de modifier la composition en essence d'un peuplement ce n'est pas forcément remettre en cause l'existence de l'aléa, mais peut traduire le refus de la parade proposée.

Le traitement irrégulier, en concentrant la production sur des arbres à fortes valeurs marchandes, oblige à se préoccuper simultanément de tous les risques, non seulement ceux liés aux perturbations climatiques, mais aussi à se préoccuper davantage des risques d'altération de la qualité interne du bois, de dépérissement ou de retournement de marché¹¹.

2.2. Connaissances sur l'aléa et conséquences sur la vulnérabilité

Le changement climatique constitue l'aléa. Les effets attendus sont une augmentation sous nos latitudes de la température moyenne annuelle, une modification de la répartition des pluies et du régime des perturbations. Les conséquences sont nombreuses. Les événements climatiques extrêmes (sécheresse de 2003, tempête de 1999, de 2009), les grandes perturbations (feux, attaques d'insectes) risquent d'être plus fréquents. Parallèlement les dépérissements diffus vont augmenter. L'augmentation du nombre d'hivers doux va rendre plus complexe le débardage sur des sols argileux, etc.

Nous avons vu que les climatologues s'efforcent de prédire au plus près l'intensité et la vitesse du changement en proposant plusieurs scénarios à l'échelle du siècle. Au-delà de la tendance moyenne le forestier est encore plus intéressé par la modification du régime des grandes perturbations (tempêtes, attaques parasitaires, feux). Dans ce domaine les incertitudes des climatologues sont plus grandes. Cette limite peut être négligée : nous avons vu que ce n'est pas parce que l'aléa ne change pas que le risque n'augmente pas.

Pour leur part, les forestiers s'interrogent sur la capacité des écosystèmes dont ils ont la charge, à s'adapter aux changements climatiques en fonction des modes de gestion. Il est vain de vouloir nier l'évolution du climat et il est donc important de chercher à réduire la vulnérabilité des écosystèmes forestiers et plus précisément dans le cadre de ce papier de sa fonction économique. Parmi les solutions pour diminuer la vulnérabilité, il est possible de citer l'augmentation des valeurs de sauvegarde, la diminution du temps de rotation du capital valeur, l'amélioration des vitesses de cicatrisation, l'augmentation de la diversité en essences, l'utilisation de la diversité génétique des arbres, etc. La capacité à supporter un stress environnemental fort et à récupérer après celui-ci diminue avec l'augmentation de la concurrence entre arbre (Lebourgeois et al, 2017). Cette information sur la vulnérabilité sera par exemple utilisée comme élément de réflexion pour réduire localement la surface terrière.

¹⁰ Selon Météo-France le nombre et l'intensité des tempêtes ont peu évolué sur la période 1950-1999 (Bessemoulin, 2002) .

¹¹ Après la tempête de 1999, la chute des cours du hêtre ont entraîné une diminution assez forte des diamètres d'exploitabilité en forêt publique dans le massif vosgien. Pour certain c'est un argument supplémentaire pour planter du douglas dans le cadre du changement climatique.

3. Différentiels de vitesse

Les modifications climatiques ne sont pas un phénomène nouveau. Durant le Quaternaire, les arbres ont subi plus de 17 alternances de périodes glaciaires et interglaciaires chacune durant plusieurs dizaines de milliers d'années. Durant ces périodes les variations de température ont été supérieures à celles actuelles. Plus proche de nous, l'Europe de l'Ouest a connu au cours des deux derniers millénaires des phénomènes semblables avec l'optimum climatique médiéval des XIe-XIIIe siècles ou bien lors du « petit âge glaciaire » (1550-1850) (Le Roy Ladurie, 2004). Les inquiétudes actuelles sont dues au fait que le changement que nous vivons est beaucoup plus rapide. Il est donc utile d'estimer le différentiel de vitesse entre le changement climatique et la capacité de réaction d'un écosystème forestier.

Vitesse du changement climatique

Si on retient un des scénarios moyens du GIEC (ni trop optimiste, ni trop pessimiste), la vitesse de déplacement vers le nord du climat serait d'environ 2 km/an.

Dans le graphique ci-contre Vmax exprimée en km/10 ans correspond à la vitesse estimée de déplacement des espèces. En abscisse, la modalité « 1 » correspond aux arbres. L'axe des ordonnées de droite correspond aux différents scénarios du GIEC. Selon ce graphique les arbres auraient du mal à suivre l'évolution du climat. C'est pourquoi certains militent pour une action rapide : « *il est urgent d'agir* » (Piermont, 2007).

Capacité de migration des essences forestières

Cette capacité de réaction des plantes peut être mesurée par la vitesse maximale auxquelles les espèces peuvent se déplacer. Elle a par exemple été mesurée pour les chênes lors de leur remontée vers le nord suite à la dernière glaciation (Kremer, 2000).

L'INRA rappelle que les essences forestières possèdent « *certaines capacités adaptatives qu'il sera important de valoriser* », mais considère que ce sera

insuffisant pour maintenir la forêt dans son état actuel. Se pose alors la question de savoir comment définir l'importance de l'écart à l'état actuel. Par exemple dans le massif vosgien, hêtre, pin sylvestre et chênes constituent l'essentiel du volume avec une importance comparable. Si on fait l'hypothèse peu probable qu'en 2100 le hêtre sera totalement éliminé (ce qui n'est pas le cas dans les cartes de prédiction de l'INRA), selon la façon dont on gère ce mélange d'essences, l'impact en terme de production de bois ne sera pas le même. Si le hêtre a été retenu comme objectif de production et utilisé de manière majoritaire, la rentabilité risque d'être sérieusement compromise. S'il fait partie d'un cortège d'essences à valoriser, l'impact pour le producteur sera nettement plus faible car les autres essences occuperont l'espace laissé vacant.

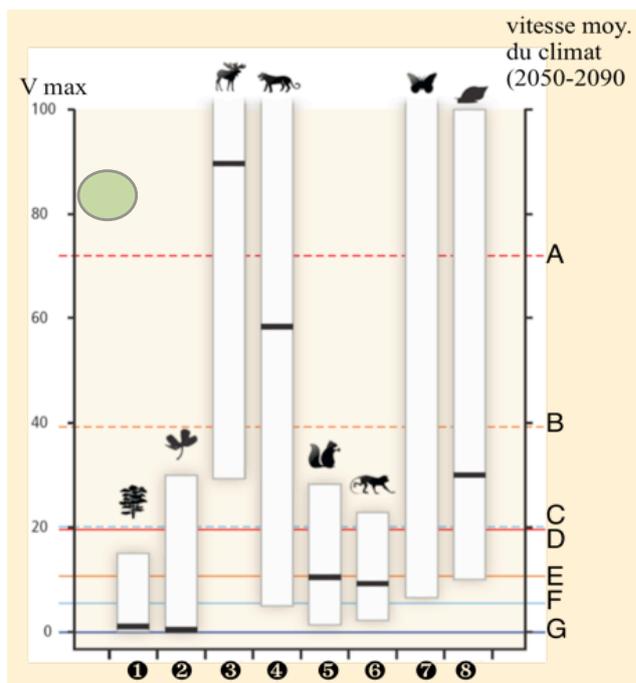
Par ses choix de gestion, le gestionnaire peut réduire la capacité de colonisation ou de maintien des essences. Par exemple, en limite des Alpes du sud et du nord, en versant sud, des trouées trop grandes ralentissent la réinstallation du sapin. Les peuplements actuels issus de la déprise agricole ont nécessité une première phase de colonisation par le pin sylvestre pour que le microclimat forestier devienne favorable au sapin. Les peuplements ont une valeur micro-climatique. Le gestionnaire doit s'efforcer de la conserver en évitant de trop fortement perturber le couvert.

Capacité de maintien dans des conditions changeantes

L'approche par la vitesse de déplacement néglige les capacités d'adaptations locales rendues possibles par la diversité génétique, l'adaptabilité¹². Les espèces exotiques témoignent, parfois malheureusement, des capacités d'adaptation dans des conditions changeantes.

Modification de l'outil industriel

En ce qui concerne la filière (première ou deuxième transformation) sa capacité de réaction est largement supérieure à celle des producteurs.



¹² adaptabilité : capacité d'évolution de la population dans un environnement changeant, incluant la plasticité des arbres en place et les évolutions génétiques entre générations (CRGF, 2014).

Temps de rotation du capital

Les arbres forestiers connaissent un cycle de développement et de reproduction long, pouvant varier de quelques dizaines d'années à plusieurs siècles. Les ordres de grandeurs sont nettement plus faibles si le raisonnement est fait pour un ensemble d'arbres, peuplement ou forêt.

A cette échelle, la vitesse du changement climatique peut être comparée à la notion de temps de rotation du capital volume ou valeur. Cet indicateur peut être calculé pour tout type de traitement sylvicole, mais il est particulièrement adapté aux traitements irréguliers dont le principe d'aménagement associé consiste à trouver le peuplement objectif ou de manière moins restrictive la plage de niveau de matériel à l'hectare optimale autour de cet objectif. La question posée devient alors : quel est le temps de rotation de ce matériel ?

Il peut se calculer de deux façons :

- temps de rotation du capital volume (temps mis pour récupérer en coupe un volume équivalent au volume initial tout en ayant à la fin ce même volume). Il est, quelle que soit l'essence, de l'ordre de 35 ans pour une unité de gestion en équilibre (parcelle en futaie jardinée ou en futaie irrégulière, forêt équilibrée traitée en futaie régulière).

- temps de rotation du capital valeur (temps mis pour récupérer en coupe une recette équivalente à la valeur initiale tout en ayant à la fin cette même valeur). Sauf exception, il est inférieur au temps de rotation du capital volume, voire largement inférieur dans le cas d'une gestion en futaie irrégulière. Cette stratégie est foncièrement différente de celle qui consiste à planter des essences à rotation de 20 à 30 ans : leur capital de départ est égal à zéro.

4. Les actions

4.1 Sur l'aléa

Les actions sur l'aléa (lutte active) dépassent de très loin les possibilités des seuls forestiers. Elles reposent sur une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre. La forêt peut quand même contribuer à l'effort d'atténuation mais de manière modeste¹³ en remplaçant l'énergie fossile par celle de la biomasse.

Forêt et bois énergie

La forêt a toujours été une source d'énergie pour les particuliers majoritairement sous forme de bois bûche et hors des circuits professionnels. Cette « autoconsommation » est estimée entre 25 et 35 millions de m³/ha, soit environ la moitié de la récolte de bois en France.

L'utilisation du bois bûche a un rôle social qui peut s'opposer à une utilisation plus industrielle du bois énergie. Le bois énergie a surtout un intérêt de substitution par rapport à l'énergie fossile car tout le CO₂ absorbé par un arbre durant sa croissance retourne dans l'atmosphère lors de sa combustion dans une chaudière. Qu'il s'agisse de bois d'œuvre, d'industrie ou de chauffage, à court ou à très long terme l'équation de la photosynthèse est équilibrée. Une stratégie possible consiste donc à s'efforcer d'augmenter la part de volume à grande durée de vie dans le volume coupé. Elle aura comme avantage un stockage de CO₂ durant plusieurs décennies.

4.2 Sur la vulnérabilité

En préalable, la gestion des forêts devra limiter les facteurs de vulnérabilité supplémentaires : tassement de sol, monoculture, export de matière organique, taux de prélèvement trop forts.

4.2.1 Composition en essence

A minima, la règle appliquée par des générations de forestiers consistant à favoriser les essences adaptées aux stations peut cependant être considérée comme une première étape dans la maîtrise du risque de production. Elle ne doit cependant pas conduire à étalonner le couple essence/station vis à vis du risque de changements climatiques. Cette recherche n'a de sens que dans le cas du traitement en futaie régulière. Dans le traitement irrégulier, au-delà d'une éventuelle fonction de production de bois d'œuvre ou de chauffage, une essence peut avoir un rôle d'éducation, de gainage, ou d'amélioration du fonctionnement des humus. Elle peut jouer ce rôle y compris dans des stations qui ne lui sont pas optimales.

¹³ Dans le cadre de la satisfaction des besoins énergétiques de la France, l'Irstea, l'Ademe ou le Cea ont essayé de chiffrer la contribution supplémentaire de la forêt en terme de bois énergie, sans concurrencer trop fortement les filières bois industrie et bois d'œuvre. L'estimation oscille entre 2 à 10 millions de TEP alors que les besoins énergétiques de la France sont d'environ 240 millions de TEP.

La répartition actuelle des essences s'explique non pas par les préférences de chaque essence, mais davantage par l'occupation historique du territoire et par le ou les facteurs limitants que chaque essence est capable de supporter. Cela explique l'importance en surface des chênes en France et la part respective du chêne sessile et pédonculé. Dans le cadre du changement climatique le chêne sessile est capable de mieux gérer les déficits en eau, mais le chêne pédonculé a un plus grand pouvoir de colonisation des terres agricoles. Durant plusieurs siècles les ouvertures fortes et périodiques des taillis-sous-futaie l'ont favorisé.

La composition en essence a très souvent évolué suite aux actions humaines mais aussi aux aléas climatiques. L'analyse d'anciens aménagements montre par exemple que le hêtre en montagne a été recherché pour ses qualités énergétiques, puis quasiment éliminé pour maximiser la production de bois d'œuvre résineux, puis à nouveau favorisé pour son rôle culturel. Dans les piedmonts de la plaine d'Alsace, le châtaignier a fortement diminué suite aux fortes gelées des années 1980. Ces exemples montrent que le gestionnaire a déjà dû faire face à des variations de la composition qu'elles soient subies ou voulues.

Des modifications importantes de la composition ont déjà été essayées. Après la seconde guerre mondiale, le vaste programme de plantation résineuse en plaine financé par le FFN¹⁴ et destiné à satisfaire nos besoins en matière de pâte à papier, a montré les limites des stratégies qui oublient que nos écosystèmes forestiers se sont construits suite à des milliers d'années d'impacts de grandes ou de petites perturbations. En plus de supprimer un peuplement existant, une plantation en plein n'est pas une opération sans risques aussi bien en terme de réussite que de rentabilité.

Tous ces éléments militent pour utiliser au maximum la dynamique des essences en place et à favoriser le mélange d'essences. La règle souvent appliquée de favoriser l'essence minoritaire va dans le bon sens.

4.2.2 Génétique

« *Au sein du monde vivant, les arbres forestiers sont parmi les espèces jouissant de la diversité génétique la plus élevée ... deux chênes tirés au hasard dans une forêt sont trois fois plus polymorphes que deux personnes tirées au hasard dans une population humaine* » (Kremer, 2000). A titre d'exemple, l'hétérozygotie pour les chênes est pratiquement 200 fois supérieure à celle des êtres humains. Les raisons de cette grande diversité génétique sont multiples : grandes aires de distribution, populations de très grande taille, dispersion des gènes à de très grandes distances, mise en place de mécanismes évitant l'autofécondation ainsi que les effets défavorables de la consanguinité (Kremer, 2000). Depuis la dernière glaciation, les principales essences arborées ont colonisé l'Europe à partir de zones refuges dont l'isolement avait généré des différenciations génétiques élevées. Or cette différence a été progressivement absorbée : les arbres ont la capacité d'accumuler de la diversité génétique.

Pour les espèces forestières dites sociales, il existe une grande diversité génétique adaptative entre origines géographiques d'une même espèce et au sein même de chaque peuplement. L'hybridation peut également jouer un rôle important : l'hybridation entre sessile et pédonculé favorise la migration du chêne sessile et contribue à son adaptation. Les espèces allochtones montrent, parfois contre notre volonté, une grande rapidité d'adaptation. La diversité génétique se révèle car elle se voit difficilement. Les essences qui valorisent une ressource sont souvent peu résistantes. Les individus qui se trouvent sur les stations les plus difficiles pour cette essence ont la plus grande variabilité génétique. Les éliminer sous le prétexte que la station ne leur convient pas conduit à une sous-utilisation de cette variabilité.

La Commission Ressources Génétiques Forestières du Ministère de l'Agriculture préconise évidemment le mélange d'essences, mais aussi de valoriser le potentiel génétique de chaque espèce (CRGF, 2014). Des plantations en point d'appui d'écotypes de la même essence ou bien d'essences différentes peuvent se concevoir comme une sorte d'assurance. Leur importance sera proportionnelle à l'aversion au risque du propriétaire ainsi qu'à la somme qu'il est prêt à payer. Planter des hêtres de la Sainte Baume à Verdun ne peut se concevoir que dans ce cadre sans que ce soit une garantie. Le WSL, organisme de recherche suisse a voulu savoir si les graines de pin sylvestre ou d'épicéa issues de régions sèches étaient mieux adaptées au climat futur de la vallée du Rhin que les graines indigènes. Dans l'expérimentation qu'ils ont mené ce n'a pas été le cas (WSL, 2016).

Dans tous les cas ces interventions ne doivent pas compromettre la capacité de résistance des peuplements en place. S'il doit y avoir interventions, elles devraient prioritairement aider les espèces peu présentes, dont les aires de répartition sont fragmentées.

¹⁴ FFN : Fond Forestier National. Créé en 1946 et alimenté par une taxe fiscale, il visait principalement à encourager le reboisement (en résineux surtout) et à désenclaver les forêts.

Le hêtre occupe une place importante en Europe, en France et sur le territoire du PNRVN aussi bien sous l'angle économique qu'écologique. Il est composé de 4 groupes génétiques issus de la dernière glaciation (Magri et al., 2006). Depuis, parallèlement à l'évolution liée à la conquête de nouveaux territoires, la gestion forestière a contribué au brassage de ces groupes : importantes plantations des années 1970 et 1980 avec des origines pas forcément contrôlées, stratégies de renouvellement (nombre de semenciers, vitesse¹⁵), sélections phénotypiques pratiquées en éclaircies¹⁶. Cette variabilité génétique s'est exprimée en Catalogne où une hêtraie a subi une augmentation de 1,65 °C en une trentaine d'années : certains génotypes ont été favorisés au détriment d'autres (Jump et al., 2006).

4.2.3 Gestion de l'existant

La production forestière devrait toujours s'inscrire dans le fonctionnement de l'écosystème, et dans la valorisation du peuplement existant. Toute volonté de transformation va soulever des sacrifices d'exploitabilité (perte de capital), des pertes de valeurs microclimatiques et de capacités d'adaptation génétique.

De nombreuses publications abordent le problème de l'adaptation des forêts (lutte passive) avec comme traitement de référence celui de la futaie régulière. Ainsi certains auteurs ont établi des listes de stations à risque. De même pour certains le problème de l'adaptation devient crucial au moment du renouvellement. Il est quand même présomptueux de réfléchir aux essences à introduire afin de coller à un climat futur que l'on ne connaît pas bien ! Comment gérer l'essence future durant la phase de transition ?

Le traitement en futaie irrégulière a comme avantage de pouvoir à chaque martelage orienter le dosage d'essences et réagir en fonction d'une évolution constatée et non supposée.

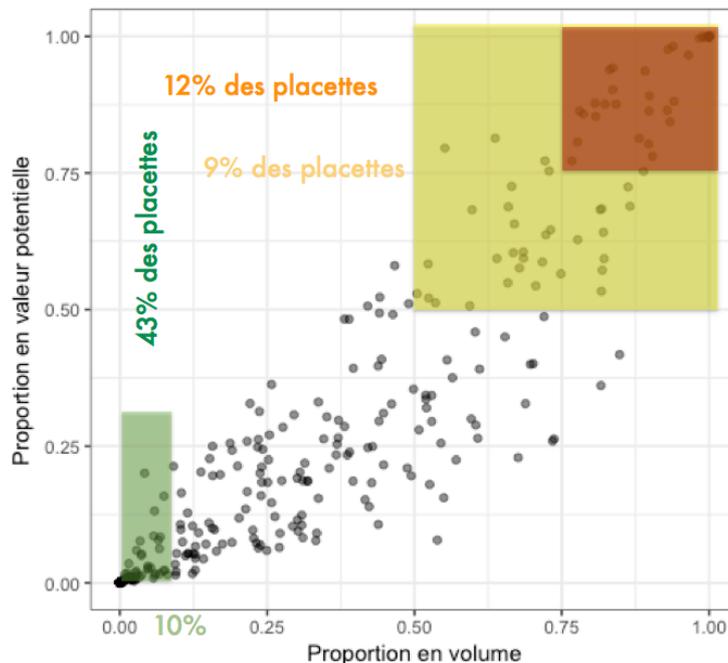
4.2.4 Maintien des corridors

Les corridors facilitant le déplacement des espèces animales ou la migration des espèces végétales peuvent être réfléchis à l'échelle d'un territoire selon les différentes occupations du sol. Ils doivent être complétés par des corridors intra-forêt.

4.3 Mesure de l'urgence

La solution d'essayer de coller à l'évolution du climat, d'orienter la gestion en fonction de la réaction des peuplements invite à se rapprocher de la méthode du contrôle de Gurnaud. Le Parc naturel régional des Vosges du Nord s'est doté en 2015 d'un réseau d'environ 400 placettes permanentes qui n'a pas été spécifiquement conçu pour suivre les impacts des changements climatiques, mais qui peut être utilisé par exemple pour faire une typologie des urgences.

La figure ci-contre présente en abscisse la proportion de hêtre en volume et en ordonnée celle en valeur potentielle, c'est-à-dire sa perspective de recettes futures. La notion de risque sera différente selon la part du hêtre dans les peuplements. Dans ce nuage, certaines placettes sont superposées. Les placettes ayant été implantées de manière systématique, les pourcentages en nombre peuvent être interprétés comme des pourcentages en surface.



¹⁵ Kramer et al. (2008) ont montré que le renouvellement des hêtraies sur des périodes courtes conduit à une perte de diversité génétique.

¹⁶ Les provenances d'altitude présentent une plus faible tendance à fourcher (Teissier du Cros, 2006).

Cette figure montre des niveaux d'urgence très différents :

- Pour 43% des placettes, la part du hêtre en volume n'atteint pas 10%. Elles ne sont pas concernées par les interrogations sur l'avenir des peuplements en cas de disparition du hêtre. Sachant que le hêtre est l'essence climatique, elles traduisent la volonté antérieure aux préoccupations sur le changement climatique, d'utiliser une autre essence que le hêtre et de freiner sa dynamique naturelle.
- Pour 12% des placettes, le hêtre représente plus de 75% du volume ainsi que plus de 75% de la valeur potentielle. C'est la situation la plus risquée. En cas de dépérissement brutal, le couvert sera fortement modifié et le producteur verra sa stratégie de recettes futures fortement compromise. En cas de dépérissement plus graduel, le suivi de l'accroissement en diamètre est une façon simple d'intégrer la variabilité génétique ainsi que les conditions de croissance. Une forte variabilité de l'accroissement en diamètre va diminuer la perception de l'enjeu et donc le risque. Dans les deux cas, le rétablissement d'un plus grand mélange devient prioritaire.
- Dans 9% des cas le hêtre représente plus de 50% du volume ou de la valeur potentielle sans appartenir au cas précédent. Ces peuplements sont moyennement risqués.
- Les autres placettes sont faiblement concernées.

4.4 Méthodes d'aménagement

En vue de s'adapter aux enjeux des changements globaux, les méthodes d'aménagement devraient respecter les principes suivants :

- Favoriser la résilience écologique, la plasticité économique des peuplements ainsi que la non obsolescence des méthodes d'aménagement.
- Etre en adéquation avec la méthode du contrôle, l'améliorer pour tendre vers des aménagements en continu.
- Préserver les options, favoriser les modes de production peu risqués.

Tous ces points militent pour de méthodes d'aménagement basées sur des contrôles à posteriori, avec des systèmes de veille et de nouveaux indicateurs selon les besoins d'information. La recherche d'un nouvel état idéal (composition, volume) fixé actuellement et permettant de surmonter le problème des changements globaux dont l'importance n'est pas parfaitement connue, qui vont certainement changer au cours du temps, dont les conséquences locales dépendent des choix faits à l'échelle de la planète, est un non-sens.

4.5 Traitements sylvicoles

Les changements globaux peuvent être utilisés comme argument supplémentaire pour dynamiser la sylviculture. Il n'est d'ailleurs pas critiquable de vouloir dynamiser la sylviculture, tout dépend de la façon dont on cherche à y parvenir. En futaie régulière, l'objectif poursuivi en diminuant par exemple les âges d'exploitabilité grâce à une augmentation de l'accroissement en diamètre est de diminuer la probabilité d'être impacté par une grande perturbation (passer à travers les gouttes !). C'est plus ou moins vrai selon la sylviculture pratiquée. De même, la diminution de l'âge d'exploitabilité est parfois justifiée par le fait que les arbres étant moins hauts leur stabilité s'améliore. Ce raisonnement est partiellement faux car la hauteur plafonne assez rapidement avec l'âge. Au stade mature, la hauteur maximale atteinte dépend avant tout du traitement sylvicole.

En matière de sylviculture la recherche académique s'est principalement intéressée au traitement de la futaie régulière. Les résultats obtenus doivent donc souvent être replacé dans ce contexte et leur généralisation prudente. A l'échelle d'un peuplement l'abaissement du capital sur pied va permettre de diminuer les besoins en eau, mais la solution de procéder à des éclaircies précoces n'est pas adaptée au traitement en futaie irrégulière.

Dans le cadre des changements globaux, le traitement en futaie irrégulière présente de nombreux avantages :

- il ne nécessite pas de fixer une ou des essences objectifs ayant des âges d'exploitabilité proche par unité de gestion.
- il évolue grâce à un système de contrôle à posteriori, ces retours périodiques d'expérience permettent d'adapter la gestion aux évolutions constatées.
- la gestion par pied d'arbres permet de concentrer l'accroissement sur les arbres de meilleures qualités et donc de réduire le temps de rotation du capital valeur.
- pour une station donnée, la hauteur atteinte est inférieure, la valeur de sauvegarde meilleure. Les grandes perturbations causent des trouées de taille inférieure si bien que la vitesse de cicatrisation est supérieure.

5. Impacts économiques

Il est utile de rappeler qu'en forêt, un bilan financier, au-delà du compte d'exploitation annuel (recettes moins dépenses) doit forcément intégrer l'évolution du capital. En situation d'équilibre, le volume coupé correspond à l'accroissement net, mortalité déduite. Celui-ci dépend de la composition en essence et du climat. Le climat peut agir de manière positive (augmentation de la productivité) ou bien négative (augmentation de la mortalité diffuse, augmentation des aléas climatiques).

Une transformation d'essence conduit à ajouter à la somme actualisée des dépenses (investissement initial plus dégagements ultérieurs) la perte de valeur potentielle des arbres coupés trop tôt, corrigée par un taux de mortalité si la sylviculture initiale avait été poursuivie. Les soins sylvicoles du traitement précédent doivent être retirés.

$$Perte = D_o + \Delta V_p (1 - M) - D_s$$

avec D_o = somme des dépenses actualisées pour introduire la nouvelle essence
 ΔV_p = somme des pertes de valeurs potentielles
 M = taux de mortalité
 D_s = dépenses en soins sylvicoles du traitement précédent

Cette perte correspond à une dépense initiale qui va d'emblée être pénalisée par le laps de temps avant retour sur investissement. Jusqu'à présent les politiques de subvention ne font que réduire la variable D_o . De plus, l'analyse économique de l'introduction d'une nouvelle essence est rarement accompagnée des risques liés à cette nouvelle production. Par exemple le douglas proposé pour remplacer le hêtre dans les Vosges possède également des parasites, a également une sensibilité aux épisodes de forte sécheresse selon sa région de provenance, peut avoir un caractère invasif et sa stabilité sur certains sols n'est pas bonne, etc.

Conclusion.

L'aléa changements globaux est une réalité qui a des répercussions bien au-delà des écosystèmes forestiers. Les travaux effectués par les climatologues et les écologues doivent être poursuivis afin de mieux cerner son intensité et occurrence. En parallèle les gestionnaires forestiers doivent s'efforcer de réduire la vulnérabilité des peuplements en jouant aussi bien sur les enjeux que sur les parades. Les opérations de communication incitant à transformer¹⁷ leurs peuplements ont souvent comme postulat que les propriétaires publics ou privés ne sont pas correctement informés sur l'aléa. C'est ignorer la non-adéquation de cette parade, les risques qu'elle possède, les intérêts propres des différents acteurs de la filière, gestionnaire, exploitant, pépiniériste. Améliorer la capacité de réaction des peuplements en commençant par augmenter leur naturalité, par utiliser au mieux leur résilience a comme énorme avantage de minimiser les coûts aussi bien publics que privés. Le traitement en futaie irrégulière basé sur la gestion individuelle des arbres, sur l'utilisation de la dynamique naturelle et le réajustement de la gestion suite à des contrôles périodiques offre plus de garanties d'adaptation à cet aléa. Condamner un peuplement en place sous prétexte que les stations ne lui conviennent pas où que certaines essences ont une probabilité de mortalité supérieure, c'est perdre la capacité de réaction de certains individus. La forêt française a augmenté de 6 millions d'hectares sur le dernier siècle essentiellement par dynamique naturelle. C'est un formidable moteur. Avant de vouloir le remplacer, autant l'utiliser.

¹⁷ En sylviculture, la transformation consiste à modifier l'essence en place.

Bibliographie

- * **Aitken** S.N. et al. 2008. Adaptation, migration or extirpation : climate change outcomes for tree populations *Evolutionary Applications* 1, 95-111. ISSN 1752-4563
- * **Badeau** V., Becker M., Bert D., Dupuey J.-L., « Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies in France », in H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl & J.P. Skovsgaard (eds), *Growth trends in European forests*, European Forest Institute, Research Report 5, Springer Verlag, 1996, pp. 167-181.
- * **Becker** M., Nieminen T.M., Géréma F., « Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂ », *Annales des Sciences forestières*, n° 51, 1994, pp. 477-492.
- * **Bontemps** J.-D., Vallet P., Hervé J.-C., Rittié D., Dupuey J.-L., Dhote J.-F., 2005. Des hêtraies qui poussent de plus en plus vite : vers une forte diminution de leur âge d'exploitabilité ? - *Revue Forestière Française*, LVII(2)
- * **Cemagref**, ARMINES et A. MTDA, 2000 : Cartographie du risque d'incendie de forêt – recherche méthodologique pour la mise en adéquation des besoins, des méthodes et des données. Rap. tech., Cemagref, 2000.
- * **Cherkaoui**, Auxane et Marwan Al Heib, 2014. Impact du changement climatique sur la stabilité des versants. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Beauvais, 8-10 juillet.
- * **CRGF**, 2014. Préserver et utiliser la diversité des ressources génétiques forestières pour renforcer la capacité d'adaptation des forêts au changement climatique.
- * **ForêtsdeFrance**, 2007. Le changement climatique et la forêt : une réalité. n° 509 - décembre - p17.
- * **GIEC** 2014, Changements climatiques - Rapport de synthèse
- * **Jump** A. et al., 2006. Natural selection and climate change : temperature-linked spatial and temporal trends in gene frequency in *Fagus sylvatica*. *Molecular Ecology* n°15, pp. 3469-3480.
- * **Kalaora**, B. et Savoye, A., 1984 : Forêt et sociologie. Rap. tech., INRA.
- * **Kalaora**, B. et Savoye, A., 1989 : La forêt pacifiée. les forestiers de l'école de la plaine, experts des sociétés pastorales. *Annales. Economies, Sociétés, Civilisations*, 44(5):1100–1101.
- * **Kramer** K. et al., 2008. Bridging the gap between ecophysiological and genetic knowledge to assess the adaptive potential of European beech. *Ecological Modelling* vol. 216 (3-4), pp. 333-353
- * **Kremer** A., 2000. Changements climatiques et diversité génétique - RFF LII, numéro spécial.
- * **Kremer** A., Ronce O, Robledo-Arnuncio JJ, Guillaume F, Bohrer G, Nathan R, Bridle JR, Gomulkiewicz R, Klein EK, Ritland K, Kujala A, Gerber S and Schueler S (2012) Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecology Letters*. 15:378-392.
- * **Kremer**, A., 2016. Microevolution of European temperate oaks in response to environmental changes. *Comptes Rendus Biologies* 339, 263-267
- * **Le Roy Ladurie**, Emmanuel , *Histoire du climat depuis l'an mil*, Paris, Flammarion, 1967. *Histoire humaine et comparée du climat*, Paris, Fayard, t. 1 Canicules et glaciers xiii^e – xviii^e siècles, 2004 ; t. 2, Disettes et révolutions, 2006 ; t. 3, Le réchauffement de 1860 à nos jours, 2009.
- * **Lebourgeois** François et al, 2017 : Adapter les itinéraires sylvicoles pour atténuer les effets du changement climatique. Résultats pour la chênaie sessiliflore française à partir des réseaux d'expérimentations sylvicoles. *Rev. For. Fr.* LXIX - 1-2017 - AgroParisTech, pp. 11-32.
- * **Lenoir** J., Gégout J.C., Marquet P., de Ruffray P., Brisse H., 2008 - A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science*, 27 Juin 2008.
- * **Liébault**, Frédéric, 2003 : Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies), Thèse de doctorat en Géographie, aménagement et urbanisme, Lyon 2.
- * **Magri**, Donatella et al., 2006. A new scenario for the Quaternary history of European beech populations: palaeobotanical evidence and genetic consequences. *New Phytologist* 171: 199–221
- * **Martin** Stéphane, Ducouso Alexis, Valadon Alain, 2009. Conserver les ressources génétiques du hêtre en France : pourquoi, comment ? *RDV techniques* n°23-24 - ONF.
- * **Piermont**, 2007 : « Changement climatique : l'inflexion de la sylviculture engagé par la société forestière de la caisse des dépôts » *RFF* vol. n°2 pp. 129-135
- * **Stephenson** N. L., Das A. J., Zavala M. A., 2014. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature* volume 507, pp. 90–93.
- * **Teissier-du-Cros**, E., 2006. Apports de la génétique dans la gestion durable de la hêtraie. *Revue Forestière Française* vol 58 (1), pp. 13-28
- * **WSL**, 2016 : Les graines des pins sylvestres indigènes germent mieux que celles des pins sylvestres d'Europe du Sud et de l'Est. n°1, pp 22-23.