



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et du Développement durable

Administration de la nature et des forêts

Le renforcement de la résilience des forêts du Grand-Duché de Luxembourg

Rapport du groupe de travail du Programme Forestier National

Diekirch, le 30 mai 2022

Table des matières

Introduction	3
1. Évolution de la situation sanitaire des forêts au Luxembourg	3
2. Avancées scientifiques.....	5
3. Recommandations pour le Luxembourg.....	7
1) Renforcement de la diversité et de la complémentarité des essences (Erhöhung der Baumartenvielfalt)	7
2) Maintien et renforcement de la diversité génétique des arbres (Erhöhung der genetischen Vielfalt).....	9
3) Augmentation de la diversité des structures (Erhöhung der Strukturvielfalt)	11
4) Amélioration de la capacité de résistance des arbres aux perturbations (Erhöhung der Störungsresistenz der Einzelbäume).....	12
5) Adapter les infrastructures aux conditions futures (Anpassung der Infrastrukturen an neue Gegebenheiten)	13
4. Autres aspects en relation avec la résilience des forêts	15
5. Priorités des mesures lors de la mise en œuvre	15
Conclusions	16
Annexes.....	17
Bibliographie	18

Introduction

Les effets du changement climatique sur les écosystèmes forestiers en Europe sont de plus en plus marqués, particulièrement suite aux extrêmes climatiques des années 2018-2020. Les perturbations atteignent des niveaux jamais connus auparavant dans les forêts européennes (+232% feux, +602% attaques insectes, +139% chablis, en 40 ans). L'émergence de nouveaux risques liés avant tout à l'action d'une multitude de parasites augmente encore davantage l'incertitude. La gestion classique du risque visant à éviter des perturbations et à réduire leurs impacts arrive à ses limites et ne semble plus être appropriée. Il devient urgent de consacrer plus d'efforts à l'amélioration de la résilience des forêts, c'est-à-dire leur capacité à surmonter elles-mêmes les altérations de leur environnement. Les actions proposées par les scientifiques pour améliorer la résilience des écosystèmes forestiers sont nombreuses et leur application exige des compromis.

L'objectif du groupe de travail était de faire le point sur la question de la résilience des forêts au Luxembourg en analysant l'évolution de la situation sanitaire des forêts, en résumant les différentes pistes d'actions proposées par les scientifiques, en discutant leur applicabilité et en identifiant d'éventuels compromis à envisager.

Le groupe de travail s'est réuni à 3 reprises de juin à novembre 2021. Ce rapport propose une liste de mesures et des recommandations pour renforcer la résilience des forêts au Luxembourg. Tous les points n'ont pas fait l'unanimité des membres du groupe. En cas de divergences de vues, celles-ci sont mentionnées dans le texte.

1. Évolution de la situation sanitaire des forêts au Luxembourg

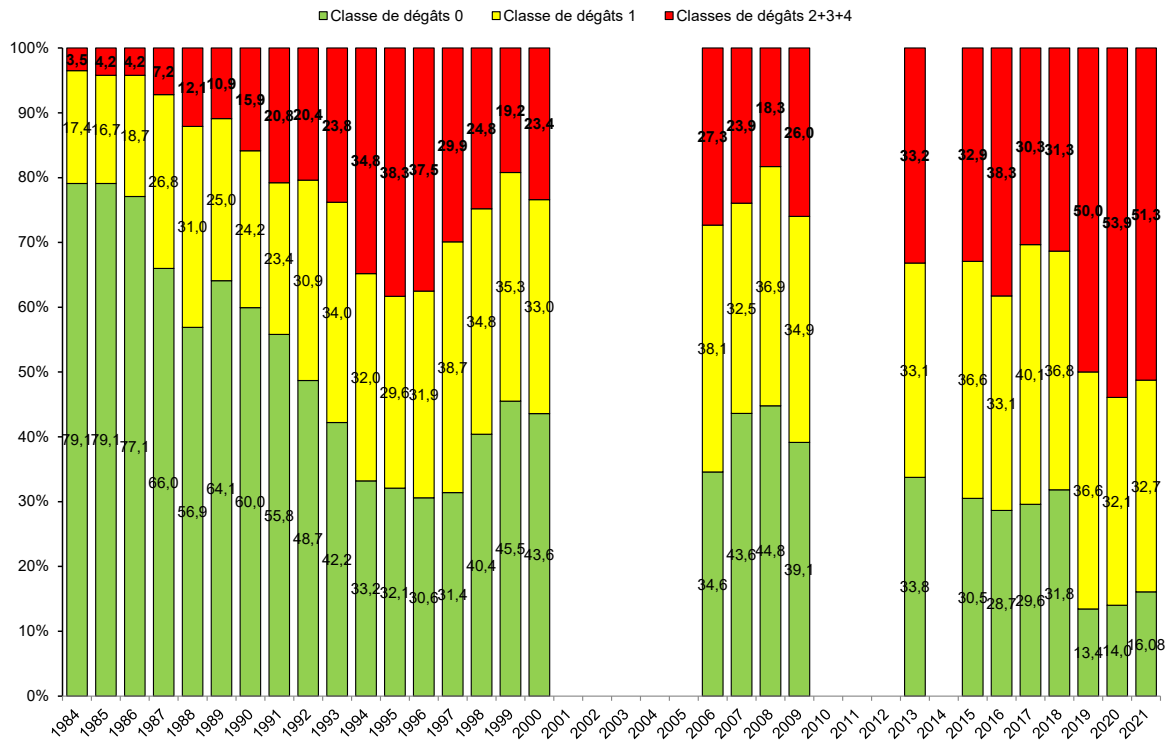
Après une première dégradation significative observée au milieu des années 90, l'état phytosanitaire des forêts au Luxembourg a oscillé à un niveau non satisfaisant, mais pas alarmant. Il y avait certes quelques aggravations, mais qui se limitaient généralement à une année. Pendant cette période, un tiers en moyenne des arbres étaient nettement et/ou fortement endommagés et la mortalité ne dépassait pas 2%, sauf à deux reprises pour l'épicéa au début des années 2000. Malgré le changement abrupt des conditions climatiques en 2018, les résultats de l'inventaire réalisé en juillet-août 2018 ne montraient pas encore de changement notable en raison du décalage des effets perceptibles généralement sur les arbres.

A partir de 2019, l'état phytosanitaire des arbres s'est brutalement dégradé à un niveau jamais observé depuis le début des inventaires en 1984. La proportion d'arbres nettement et/ou fortement endommagés passe en une année de 31% à plus de 50% et continue sa descente jusque 57% en 2021. Moins de 10% des arbres sont évalués comme ne présentant aucun signe de dégâts en 2021.

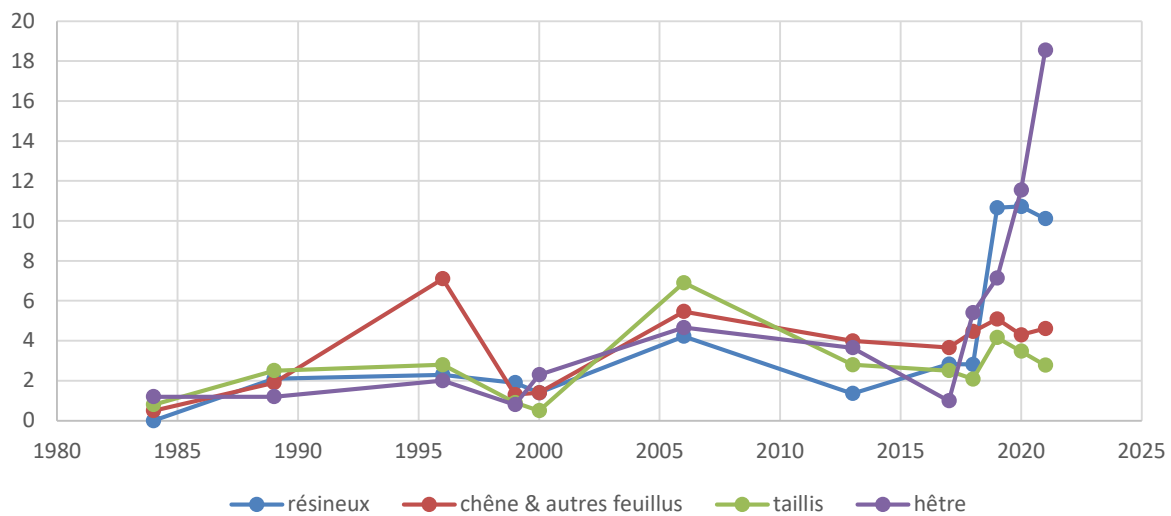
Les observations des quatre dernières années montrent donc que l'état de santé des forêts est très préoccupant. Toutes essences confondues, on constate que depuis 2019:

- 13-18 % des arbres ne présentent pas de dommages (classe de dégâts : 0),
- 32-37 % des arbres sont légèrement endommagés (classe de dégâts : 1),
- 50-54 % des arbres sont nettement et/ou fortement endommagés ou des arbres morts (classes de dégâts : 2, 3 et 4)

État de la santé de toutes les espèces d'arbres



% arbres dépérissants & morts (classe 3 & 4)



La proportion d'arbres toutes espèces confondues qui dépérissent ou qui sont déjà morts (classe de dégâts 3+4) passe en 4 années de 2,5 à 10,4 %. L'effet est particulièrement visible pour 2 essences, l'épicéa (3 à 10%) suite à la multiplication des scolytes et surtout le hêtre dont la proportion d'arbres dépérissants ou morts passe de 1% en 2017 à 19% en 2021.

La situation globale du hêtre (toutes classes confondues) semble enfin se stabiliser. Elle reste cependant inquiétante en 2021 pour les arbres fortement atteints avec 3% de mortalité (classe 4) et 16% d'arbres présentant une défoliation supérieure ou égale à 65% de leur masse foliaire normale (classe 3). A noter que la proportion de hêtre de la classe 3 se situait dans les années 80 et 90 autour de 1% et grimpe en seulement 4 années de 2017 à 2021 de 1% à 16%. La dégradation du hêtre est

donc très significative et s'explique en partie par le fait que cette essence a pu coloniser au Luxembourg depuis des siècles des sols lourds peu adaptés à son système racinaire, mais sans conséquence à cette époque sur sa santé en raison du climat favorable. Les analyses réalisées dans le cadre de la mise en place du fichier écologique des essences confirment cette observation.

En conclusion, on peut donc affirmer que les saisons de végétation extrêmement sèches et chaudes des années 2018-2020 ont eu des répercussions négatives très marquées sur l'état de santé des forêts au Luxembourg, et ceci à un degré jamais observé auparavant, notamment en ce qui concerne les épisodes de canicules dont l'effet sur nos arbres n'a encore jamais pu être étudié. Les prévisions des modèles climatiques indiquent que ces perturbations climatiques vont se répéter de plus en plus souvent et à une intensité croissante. Il est donc indispensable de préparer au plus vite et dès à présent les arbres à ce type de phénomènes en renforçant globalement la résilience de leurs écosystèmes.

2. Avancées scientifiques

Sans vouloir prétendre à une analyse exhaustive des recherches dans ce domaine, le groupe de travail a considéré les travaux de révision de 3 scientifiques publiés au cours des dernières années, à savoir :

- Marcus Lindner (European Forest Institute): *Adaptation to Climate Change in Sustainable Forest Management in Europe*; Forest Europe 2020
- Peter Brang (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, peter.brang@wsl.ch): *Waldbauliche Strategien im Klimawandel* ; in « *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien.* », BAFU Bern 2016
- Rupert Seidl (BOKU, Wien ; Technische Universität München): a) *The Shape of Ecosystem Management to Come: Anticipating Risks and Fostering Resilience* ; BioScience overview articles, 2014; b) *Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services* ; Journal of Applied Ecology 2016.

Le renforcement de la résilience des écosystèmes forestiers face aux perturbations climatiques représente un élément clé dans chacune de ces publications. Rupert Seidl considère même que c'est la principale voie à poursuivre systématiquement pour adapter les forêts au changement climatique.

Les trois principales mesures de renforcement de la résilience proposées par tous les auteurs consistent à augmenter :

- la diversité spécifique et génétique des arbres, y compris leur complémentarité ;
- la diversité de structure des peuplements ;
- la capacité de réactivité des arbres individuels aux perturbations en réduisant les facteurs de stress liés aux activités humaines directes et indirectes (ouverture minimale de la canopée, protection des sols et des arbres lors de l'exploitation, régulation efficace du gibier, ...).

En outre, certains auteurs proposent :

- d'augmenter la capacité de mémorisation des systèmes (Förderung der System-Erinnerung) en maintenant des vieux arbres et des arbres morts ;
- de saisir toutes les opportunités fournies par les perturbations pour fonder des nouveaux peuplements plus adaptés aux stations et aux futures conditions climatiques ;
- d'adapter les infrastructures en réduisant leur impact sur l'ouverture des peuplements ;

- de continuer à mieux comprendre les processus naturels, les facteurs d'adaptation des arbres, la complémentarité des fonctions des espèces dans les mélanges ;
- de promouvoir la migration assistée des espèces et des provenances pour renforcer la diversité spécifique et génétique.

Les auteurs ont également identifié 6 principes de gestion à mettre en place pour renforcer la résilience des forêts, à savoir :

- gérer de manière dynamique et expérimentale (adaptive management)
- gérer par processus en maintenant et améliorant les processus écologiques et caractéristiques fonctionnelles
- considérer les compromis et les conflits
- gérer en fixant des priorités
- gérer dans l'optique de solutions réalistes
- considérer les perturbations comme des opportunités de gestion.

Il faut donc globalement :

- diversifier au maximum les actions, respectivement renoncer aux actions schématiques sur des grandes surfaces,
- saisir les opportunités Win/Win, chercher des compromis pour les actions Win/Loss,
- appliquer les principes ci-dessus de façon différenciée dans le temps et dans l'espace.

Certaines mesures du Plan national d'adaptation au changement climatique 2018-2023 (PNACC) décidées par le Gouvernement (voir lignes en bleu dans le tableau ci-dessous) sont des mesures de renforcement de la résilience des forêts ou contribuent indirectement à son renforcement.

Plan	N°	Mesure d'adaptation au changement climatique	statut (projet)
PNACC	F01	Cartographie complète des biotopes forestiers	réalisé
PNACC	F01	Identification des forêts sensibles au climat	en cours (FEE)
PNACC	F01	Recherche et suivi visant à recenser et à surveiller la diversité génétique et le potentiel d'adaptation	en cours (EUFGIS)
PNACC	F01	Recherche visant à recenser les impacts des néophytes envahissants sur les fonctions de la forêt et suivi des néophytes	planifié
PNACC	F01	Suivi de l'étendue et des répercussions de la pression d'abrutissement exercée par les ongulés sauvages sur la composition des essences	en cours (projet Weisergatter)
PNACC	F01	Élaboration d'un catalogue de mesures pour une sylviculture viable dans le contexte d'un climat en mutation	en cours
PNACC	F02	Conversion des monocultures en forêts mixtes	en cours
PNACC	F02	Suivi et lutte contre les organismes nuisibles	en cours
PNACC	F02	Diversification des structures et adaptation des soins	en cours
PNACC	F03	Adaptation des modalités d'exploitation du bois et subvention des modes protégeant les sols et les eaux	en cours / réalisé
PNACC	F03	Sélection des essences d'arbres appropriées au site	en cours (FEE)
PNACC	F03	Amélioration des soins cultureux, notamment ceux apportés au fourré pour renforcer leur vitalité	en cours (QD)
PNACC	F03	Fertilisation/amendement du sol	en conflit (PL7255)
PNACC	F03	Amélioration de la régulation du gibier	en cours (Plan tir)

D'autres mesures encore non mentionnées ci-dessus sont également recommandées par les scientifiques pour adapter les forêts et le secteur forestier au changement climatique, notamment :

- l'identification et le test de nouvelles espèces et provenances théoriquement compatibles avec les conditions prévues (Lindner et al 2020) ;
- la gestion des risques par la réduction des durées de révolution, respectivement du diamètre d'exploitation (Brang et al 2016).

A noter aussi que le guide de gestion forestière « Leitfaden für forstliche Bewirtschaftungsmaßnahmen von geschützten Waldbiotopen » (<http://www.environment.public.lu/forets/dossiers/pfn/documents/Leitfaden-160330.pdf>) propose déjà une multitude de mesures qui sont pertinentes pour l'adaptation des forêts au changement climatique et qui sont en partie des mesures de renforcement de la résilience.

3. Recommandations pour le Luxembourg

Parallèlement aux mesures déjà en cours de réalisation dans le cadre de la mise en œuvre du PNPN et du PNACC, et qui ont un impact positif sur la résilience, telles que notamment le nouvel outil permettant d'identifier les essences adaptées à la station (fichier écologique des essences), le groupe de travail a analysé les propositions des scientifiques et discuté leur pertinence et leur applicabilité au Luxembourg.

1) Renforcement de la diversité et de la complémentarité des essences (Erhöhung der Baumartenvielfalt)

- Situation : Les résultats de l'IFL2 montrent que la diversité des essences était stable entre 2000 et 2010 (3,3 en moyenne par type de peuplement - chapitre 10 IFL2). Elle n'a probablement pas changé de façon importante depuis lors. Comparée à d'autres forêts tempérées semi-naturelles, notamment celles de la côte Est d'Amérique, elle est faible et probablement largement insuffisante pour la plupart des peuplements afin de faire face au défi climatique. La complémentarité des essences de nos forêts n'a pas encore été analysée en détail à ce jour.
- Risques/problèmes :
 - a. L'abrutissement sélectif des jeunes plantules d'arbres au stade de la régénération par le gibier est très important ce qui induit une forte baisse de la diversité spécifique. S'y ajoute la consommation massive et sélective de semences.
 - b. L'enrichissement de la diversité par la régénération naturelle est très lent, car le nombre et la diversité des semenciers sont insuffisants, indépendamment du problème de prélèvement par le gibier.
 - c. Les plantations sont des opérations manuelles qui nécessitent beaucoup de personnel technique et un sens aigu de l'organisation (coordination des travaux et des commandes de matériel).
 - d. Les besoins financiers en cas de plantation sont importants, mais à priori couverts par les aides fournies par l'Etat.

- e. La disponibilité des plants en pépinière est variable et incertaine.
 - f. La gestion en irrégulier des mélanges d'essences demande une bonne connaissance de la dynamique entre les différentes essences et une gestion simultanée dans les différents étages. Il faut du personnel bien formé (besoin en formation) et plus de moyens (ressource personnel et budget) qu'en futaie régulière.
- Recommandations :
 - a. Il faut améliorer substantiellement la **régulation du gibier**, principalement des cervidés (déterminer la pression du gibier, ajuster les plans de tir, améliorer le contrôle de l'exécution des plans de tir, communiquer avec les chasseurs et les gardes chasse).
 - b. Il faut **enrichir par des plantations adaptées à la station les régénérations naturelles** pauvres en diversité spécifique lors de la phase de régénération du peuplement ou dans les trouées temporaires (chablis, mortalité), plus particulièrement les monocultures et les peuplements hors station (ex : hêtraies sur sols lourds).
 - c. Il faut **utiliser les « perturbations »** biotiques et abiotiques pour diversifier les forêts : convertir les peuplements non en stations ou regarnissage de régénérations naturelles insuffisantes → trouées dépérissement du hêtre / épicéa bostryche / chablis/... .
 - d. Lors des plantations de reboisement et de boisement à neuf il faut **augmenter le nombre d'essences plantées en mélange**. Même s'il faut replanter, il ne faut pas négliger la régénération naturelle en station qui est déjà présente. Une régénération naturelle en station a toujours la priorité sur une plantation. Lors des plantations, il faut aussi respecter la situation topographique, p.ex. l'exposition (direction vents dominants, ...) pour diminuer le risque de chablis.
 - e. Lors des plantations, la gestion du **risque des feux** de forêt doit être intégrée dans le choix des essences. Ainsi, près des habitations ou autres infrastructures (« urban interface »), il faut éviter de planter des résineux ou autres essences très inflammables.
 - f. **Quelles sont les essences à planter pour enrichir la diversité spécifique?** Tous les scientifiques sont d'accord qu'il faut planter des essences adaptées à la station. Par contre, ils sont divisés quant à l'intérêt et aux risques d'utiliser des essences qui ne font pas/plus partie du cortège écologique actuel, c'est-à-dire des essences exotiques (alternative Baumarten). Le groupe de travail n'a pas trouvé un consensus sur ce point. Les risques liés au choix des essences doivent être gérés et assumés par chaque propriétaire forestier. Le groupe de travail fait cependant les recommandations unanimes suivantes : il faut maintenir et favoriser prioritairement et en mélange les essences indigènes ; il faut privilégier le recours à des nouvelles provenances d'essences indigènes, plutôt qu'à des nouvelles essences (voir point 2); en cas d'introduction de nouvelles essences non indigènes, celles-ci doivent se faire si possible de façon expérimentale en mélange avec les essences indigènes ; ces introductions (migrations assistées) doivent être encadrées par un suivi scientifique ; dans tous les cas, l'introduction de nouvelles essences n'est à envisager que pour l'enrichissement de la diversité des essences, pas pour le remplacement des essences actuelles ; il faut définir au niveau national les conditions de ces expériences de migration assistée, notamment en excluant les zones protégées. Une étude de révision récente concernant ces essences exotiques (alternative Baumarten) est jointe en annexe 1.
 - g. Il faut **renoncer à tous les travaux d'interventions systématiques et surfaciqes** en forêt qui risquent de réduire la diversité des essences lors des dégagements et des éclaircies ; tous les travaux doivent être sélectifs.

- h. Il faut **améliorer la complémentarité des essences** dans les mélanges ; des indications à ce sujet se trouvent dans les fiches essences du FEE ; ne pas oublier les essences héliophiles. Une étude sur la complémentarité des essences est à initier.
- i. Il faut élaborer un **programme des disponibilités des plants pour les pépinières**, respectivement établir un plan de gestion des pépinières pour assurer le nombre de plants nécessaire (3-Joères-Programm).
- j. Il faut **prévoir une augmentation du budget des aides d'Etat** pour les travaux de plantation, notamment pour les aides d'Etat (article budgétaire 52.2.53.020) et pour la gestion des forêts publiques (article budgétaire 22.2.12.306 pour les forêts domaniales).
- k. Il faut favoriser, dégager/détourer, « wertästen » les essences rares et favoriser les essences héliophiles présentes en forêt, surtout dans le sous-étage, notamment celles des plantations réalisées suite à la tempête de 1990.

Dans sa publication « *The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes* », Christian Messier et al. (2019) propose un concept original de réseau complexe fonctionnel pour montrer comment mettre en œuvre la diversification des essences. Il propose de maximiser la diversité fonctionnelle des forêts, c'est-à-dire avoir le plus de groupes fonctionnels possibles (par exemple, mélanger des feuillus et des résineux, des essences sciaphiles et héliophiles), mais aussi avoir une certaine redondance fonctionnelle, c'est-à-dire avoir plusieurs essences appartenant au même groupe fonctionnel. La diversité assure le bon fonctionnement de l'écosystème tandis que la redondance permet à celui-ci de ne pas être altéré si une espèce est touchée par une perturbation.

Il serait intéressant de réaliser une liste des groupes fonctionnels pour les essences des forêts du Luxembourg afin de tester et d'appliquer ce concept sur des parcelles d'essai. Ce travail pourrait être réalisé en parallèle avec l'analyse sur la complémentarité entre les essences, telle que suggérée par Anke Jentsch.

2) Maintien et renforcement de la diversité génétique des arbres (Erhöhung der genetischen Vielfalt)

- Situation : La diversité génétique naturelle des arbres est a priori élevée, mais elle n'a pas été analysée à ce jour dans les forêts du Luxembourg, mise à part quelques données sur l'origine génétique de nos chênes. Un indicateur de diversité génétique des forêts a été élaboré par EUFORGEN (indicateur 4.6 de Forest Europe) (EUFORGEN 2020) et est mis à jour grâce à la base de données EUFGIS.
- Risques/problèmes :
 - a. La fragmentation des forêts est élevée au Luxembourg. Or, la fragmentation des populations d'essences rares diminue leur diversité génétique.
 - b. Les manipulations lors de la production et de l'utilisation de matériel forestier de reproduction peuvent avoir un impact négatif sur la diversité génétique (EUFORGEN 2021).
 - c. Il est difficile de se procurer des provenances variées en pépinière.
- Recommandations :

- a. Dans leur révision scientifique sur les mécanismes d'évolution génétique par la sylviculture, pour l'adaptation au changement climatique, Lefèvre et al (2020) expliquent que les arbres des forêts ont un très grand potentiel de réponse évolutive au changement climatique. Les deux principaux mécanismes du potentiel adaptatif des populations d'arbres sont la (1) plasticité phénotypique des caractères individuels (*la capacité des arbres à ajuster certains caractères morphologiques ou physiologiques en fonction de l'environnement ; il s'agit du potentiel d'évolution à court terme*) et (2) la capacité d'évolution (*l'évolution de la composition génétique des populations sous l'effet de la sélection naturelle ; il s'agit du potentiel d'évolution à long terme*). Les pratiques forestières ont un impact direct ou indirect marqué sur **cinq facteurs susceptibles de freiner l'adaptation** : (1) un manque de diversité génétique, (2) une élimination d'individus par d'autres mécanismes que la sélection naturelle, (3) une réduction drastique du nombre de reproducteurs efficaces conduisant à une dérive génétique aléatoire qui freine la réponse à la sélection naturelle et érode la diversité génétique, (4) des flux de gènes massifs en provenance de génotypes mal adaptés aux conditions locales, (5) une trop faible mortalité empêchant la sélection naturelle de s'exprimer ». Lefèvre et al (2020) concluent que la « complexité est une chance pour l'adaptation car elle offre une certaine flexibilité et il existe plusieurs chemins biologiques pour parvenir à une solution écologique ». **Il faut gérer la forêt en intégrant plus de complexité.** Le concept de sylviculture par et pour l'évolution proposé par les auteurs est basé sur la **régénération naturelle** et utilise des pratiques de la sylviculture proche de la nature, comme par exemple les **ilots de vieillissement** permettant de dissocier des zones d'évolution génétique et des zones de production. De nouvelles pratiques pourraient être mises en place, telles que « la dispersion assistée des graines locales » et « l'enrichissement génétique par l'introduction d'une quantité limitée de graines ou de pollen provenant d'origines allochtones présumées préadaptées de la même espèce que le peuplement ». Erwin Hussendörfer (2021) suggère lui aussi d'utiliser au maximum la variabilité naturelle des ressources génétiques locales grâce à la régénération naturelle avant d'envisager un apport de matériel génétique étranger. Pour maintenir cette diversité génétique, il faut diminuer au maximum l'intensité des interventions sylvicoles.
- b. La **plantation** reste malgré tout une option valable et parfois indispensable pour suppléer à l'absence de régénération naturelle, respectivement pour enrichir une régénération naturelle peu diversifiée sans toutefois la remplacer.
- En cas de plantation, il faut envisager si possible le recours à **plusieurs provenances adaptées à la station** lors de l'achat des matériels forestiers de reproduction. Il faut exiger la liste des provenances lors de l'achat en pépinière pour effectuer un choix avisé.
 - En cas de plantation, il faut favoriser dans les mélanges l'utilisation de **provenances plus résistantes face au changement climatique**. Une liste a été publiée par l'ANF. Cette liste est à mettre à jour sur base de critères plus variés.
 - En cas de plantation, il faut **documenter l'utilisation des provenances** pour permettre aux générations futures d'en tirer des conclusions. La réalisation d'une application de saisie des données du matériel utilisé en forêt est à l'étude.
- c. Pour **éviter une réduction de la diversité génétique lors de la production et de l'utilisation de matériel forestier de reproduction**, il est recommandé de mettre en œuvre les recommandations de l'étude EUFORGEN (*Genetic aspects linked to production and use of forest reproductive material, EUFORGEN-EFI 2021*), notamment :

- éviter le recours à des provenances sélectionnées uniquement pour leur productivité (risque de faible diversité génétique) ;
 - réduire la sélection en pépinière sur base d'un seul critère (productivité, croissance en hauteur, ...) ;
 - maintenir tous les écotypes lors des tris des graines et des plants.
- d. Il faut **sélectionner des peuplements à graines sur des stations extrêmes** pour pouvoir produire des plants génétiquement plus diversifiés. A cet effet, il faut redynamiser les pépinières pour qu'elles puissent produire ces matériaux de reproduction.
- e. En raison de la complexité des mécanismes d'adaptation liés à la diversité génétique, il est conseillé de consulter des experts pour affiner les mesures à appliquer et l'envergure de leur mise en œuvre.

3) Augmentation de la diversité des structures (Erhöhung der Strukturvielfalt)

- Situation : La diversité des structures des peuplements forestiers au Luxembourg est relativement pauvre. Plus de 80% des peuplements sont des futaies équiennes à 1-2 étages (voir chapitre 3 IFL2). Une certaine diversité est garantie à plus grande échelle par le morcellement des propriétés et les effets des calamités naturelles.
- Risques/problèmes :
 - a. La configuration homogène des peuplements équiennes actuels et l'âge avancé des futaies ne permettent pas de réaliser des changements rapides sous risque de déstabiliser et de fragiliser les peuplements actuels.
 - b. En forêt publique, les directives pour l'élaboration des plans d'aménagement ne sont pas encore adaptées au changement de structure. Une étude est en cours à l'ANF.
 - c. La diversification de la structure demande généralement des interventions fortes dans la canopée des forêts âgées avec une ouverture partielle du peuplement, ce qui présente un risque important en cas de fortes perturbations climatiques, principalement en cas de canicules.
 - d. Il y a un réel problème d'acceptation par le grand public des interventions sylvicoles nécessaires pour l'irrégularisation en forêt.
 - e. La conversion des futaies régulières en peuplements irréguliers induit dans une première phase une perte de stockage de volume de bois à l'hectare. Cette perte de la capacité de stockage de carbone n'est en général rétablie que lorsque tous les peuplements ont de nouveau atteint un nouvel équilibre, c'est-à-dire après plusieurs décennies au moins.
- Recommandations :
 - a. En raison des risques climatiques avérés et de l'impact temporaire négatif sur le stockage de carbone, **il ne faut en aucun cas envisager la restructuration des peuplements âgés par des interventions délibérées de grande envergure.**
 - b. Il faut avant tout éviter les coupes intensives dans les vieux peuplements (prélèvement $G > 20\%$) sur de grandes surfaces (> 1 ha).
 - c. L'irrégularisation des futaies âgées doit s'obtenir avant tout par un mélange opportuniste (non planifié) d'aménagement de petites zones de régénération et de maintien d'îlots de vieux arbres. A cet effet, il faut **saisir les opportunités fournies par les perturbations (chablis, mortalités)** pour régénérer et ainsi diversifier la structure des peuplements.

- d. Dans les jeunes peuplements, on peut réaliser des interventions plus variées et plus délibérées pour obtenir une plus grande diversité des structures.
- e. Il faut sensibiliser/informer le public qu'une forêt en conversion vers une forêt résiliente/adaptée nécessite des interventions.

4) Amélioration de la capacité de résistance des arbres aux perturbations (Erhöhung der Störungsresistenz der Einzelbäume)

- Situation : La capacité de résistance d'un arbre se construit tout au long de sa vie grâce à un environnement favorable (climat, sol, lumière, eau, nutriments, ...). La capacité de résistance des arbres n'est pas mesurée dans le cadre des inventaires. On peut cependant l'estimer grâce à certains indicateurs : elle est plus faible pour les arbres qui ne sont pas en station, qui ont un facteur hauteur/diamètre défavorable, qui présentent des dégâts (blessures d'exploitation, compaction sol) et qui subissent des variations de conditions brutales suite à des travaux. Globalement, on peut considérer qu'il y a en moyenne un gradient décroissant de capacité de résistance entre les arbres de peuplements naturels et ceux de peuplements artificialisés, réguliers, mono-spécifiques, hors station et à forte densité.
- Risques/problèmes :
 - a. Un certain degré d'ouverture de la canopée et l'exposition à la sélection naturelle sont nécessaires pour garantir l'adaptation à long terme des forêts par la régénération. L'ouverture de la canopée, qu'elle soit d'origine naturelle ou artificielle, constitue à chaque fois un facteur de stress pour les arbres et un risque de fragilisation temporaire du peuplement. Un mal nécessaire pour l'évolution. Il faut donc doser judicieusement l'intensité des interventions en forêt, que ce soit dans la canopée ou sur le sol, et trouver des compromis entre les mesures d'adaptation à court termes (protection des arbres et maintien de l'ambiance forestière) et la nécessité de régénérer les peuplements.
- Recommandations :
 - a. Il faut définir des marges d'ouverture de la canopée permettant à la fois la régénération, la diversification des structures et le maintien d'un climat forestier intra-peuplement favorable. En forêt publique, l'ANF a défini en 2020 les recommandations suivantes pour les peuplements feuillus matures et âgés (diamètre moyen > 25 cm) pour **réduire l'impact des coupes sur la canopée** :
 - prélèvement de maximum 20% de la surface terrière G sur une période de 5 ans ;
 - maintien d'une surface terrière minimale par hectare pour certains types de peuplements feuillus :
 - i. hêtraie du type 9110 : 18 m²
 - ii. hêtraie du type 9130 : 20 m²
 - iii. hêtraie du type 9150 : fixé par plan de gestion approuvé
 - iv. chênaie du type 9160 : 15 m²
 - v. chênaie du type BK14 : fixé par plan de gestion approuvé
 - vi. peuplement BK13 ou BK23 : 15 m²

- vii. taillis : 10 m² ;
 - les marges d'ouverture de la canopée définies ci-dessus sont des orientations qui font l'objet d'adaptations permanentes pour prendre en compte les différentes stations et l'historique des peuplements, ainsi que l'objectif de gestion visé (mélange d'essences).
- b. Tout en réduisant l'intensité des interventions, il faut également **réduire le nombre des interventions** au strict minimum (effectuer les travaux culturels et d'exploitation si possible en un seul passage).
- c. Il faut maintenir un **patchwork de zones sans interventions** (îlots de vieillissement, RFI, zones hors cadre) et déterminer la principale priorité de gestion de toutes les zones pour affiner les niveaux de coupe et pour diversifier les actions dans l'espace.
- d. Il faut strictement **respecter les conditions climatiques et les conditions des sols** lors des interventions afin d'éviter les dégâts d'exploitation au sol, notamment en améliorant le respect des conclusions de l'étude de la minéralomasse sur les sols sablonneux et sur les sols de schistes.
- e. Il faut globalement **renforcer la défense des sols contre toute dégradation** en élaborant et en appliquant des critères clairs pour l'exploitation des peuplements en général et spécialement des peuplements ravagés par des calamités naturelles en maintenant par exemple une partie du bois mort sur pied au niveau de ces peuplements pour créer des zones d'ombre, de rétention d'eau et de valeur écologique particulière.
- f. Etant donné l'impact de la récolte du bois sur l'écosystème forestier, il faut **repenser tout le système de récolte et de vente de bois**. Lorsqu'une intervention est nécessaire pour des raisons sylvicoles, il est recommandé d'identifier d'abord les acheteurs potentiels permettant une utilisation durable et en cascade des bois avant de les exploiter en forêt (vente par contrats d'approvisionnement aux entreprises locales et régionales).

5) Adapter les infrastructures aux conditions futures (Anpassung der Infrastrukturen an neue Gegebenheiten)

- Situation : Le réseau des chemins forestiers en forêt publique est globalement très dense et en bon état. 79% des forêts publiques ont une distance de débardage < 250m. Les zones sans chemins correspondent généralement aux forêts hors cadre (exploitation pas prévue par l'aménagement). Le réseau des chemins en forêt privée est moins dense et souvent en moins bon état. 69% des forêts privées ont une distance de débardage < 250m. Globalement, 90% des forêts au Luxembourg ont une distance de débardage < 500m (IFL2).
- Risques/problèmes :
 - a. Les infrastructures sont essentielles pour une gestion dynamique et adaptative des peuplements, que ce soit pour les soins culturels ou pour l'exploitation.
 - b. La qualité du réseau des chemins forestiers est essentielle pour la lutte contre les feux de forêt (accessibilité et « firebreaks » ; risque croissant) et pour la sécurité des travaux en forêt (points d'évacuation).
 - c. L'ouverture de la canopée pour la construction de nouveaux chemins dans les peuplements âgés et à essences sciaphiles constitue un risque important de baisse de la capacité de résistance des arbres en cas de fortes perturbations climatiques, principalement les canicules.

- Recommandations :
 - a. Il faut **maintenir un réseau de chemins forestiers en bon état** pour pouvoir assurer les travaux forestiers et pour assurer la lutte contre le feu et l'accès aux points d'évacuation des secours.
 - b. Un **inventaire de l'existant** et une **analyse de la densité optimale** de chemins forestiers est à réaliser préalablement à toute nouvelle construction, notamment dans le cadre des aménagements en forêt publique et lors de l'allocation des aides en forêt privée.
 - c. Des **nouveaux concepts de desserte plus respectueux de l'écosystème** et de ses fonctions sont à élaborer avant la fin de la période du moratoire actuel (mars 2023) sur la construction de nouveaux chemins dans les peuplements feuillus des forêts publiques. Dans ce contexte, il faut :
 1. réduire la largeur des emprises en optant pour une exploitation de bois courts ;
 2. envisager des rayons de débardage moyens plus longs (supérieur à 150m) ;
 3. revoir à la baisse les densités des chemins forestiers dans les peuplements présentant des surdensités et ne plus utiliser les chemins superflus ;
 4. adapter les densités des chemins forestiers aux priorités de gestion (zones à préserver) ;
 5. différencier l'approche des projets de remembrement forestier selon le statut de protection des forêts (ZPIN, Natura2000, ...) ;
 6. adapter les concepts de sécurité en forêt.

Le groupe de travail n'a pas retenu une des mesures proposées par les scientifiques, la réduction des âges de révolution ou des diamètres d'exploitabilité (Reduktion der Umtriebszeit bzw. des Zieldurchmessers). Elle n'est pas compatible avec les objectifs d'augmentation du volume sur pied consistant à stocker plus de carbone en forêt (objectif F01 du Plan national Energie et Climat). En effet, la réduction des âges/diamètres d'exploitabilité entraînerait une forte diminution à court terme des volumes sur pieds au Luxembourg, une perte de biodiversité (espèces inféodées aux arbres anciens) et une perte de patrimoine génétique.

Conformément au Plan National Énergie et Climat, les âges de révolutions ont par contre été augmentés par l'ANF en 2020 en forêt publique pour augmenter la capacité de stockage de carbone des forêts, mais aussi pour permettre des périodes plus longues de régénération et une meilleure sauvegarde du patrimoine génétique existant. Les âges d'exploitabilité ont été adaptés de la manière suivante : (BU : 140→200 ans, EI 200→260 ans, ES AH 80→100 ans, FI DG 70→100 ans, KI 120→140 ans).

Cette adaptation n'est cependant pas non plus sans risque pour le propriétaire. Elle augmente à court terme le risque de perte de revenu et à long terme le risque de dépérissement des vieux arbres en cas d'événement climatique extrême et la transformation de ces forêts en émetteur de carbone. Il faut donc veiller à maintenir un rythme de régénération suffisant pour conserver un équilibre des âges/diamètres à redéfinir et qui est compatible avec un rapport soutenu dont le concept est en cours de redéfinition.

4. Autres aspects en relation avec la résilience des forêts

Certaines questions en relation avec la résilience des forêts n'ont pas pu être débattues suffisamment en détail lors des travaux du groupe de travail pour en déduire des recommandations. Il s'agit notamment des points suivants dont les pistes de réflexion sont résumées ci-dessous et devront faire l'objet d'autres travaux.

- Quelles sont les mesures à mettre en place pour une meilleure gestion future des feux de forêt ? Des conclusions sont à élaborer par le nouveau groupe de travail CGDIS en analysant les aspects suivants :
 - croiser les données « fuel types » avec « fire weather indices » et topographie, infrastructures et points d'accès ;
 - faire l'inventaire des « fire breaks » naturels et humains ;
 - élaborer un plan d'action « feu de forêts » ;
 - sensibiliser la population et informer sur le risque d'incendie ;
 - élaborer des mesures prioritaires en proximité des habitations (corridors de sécurité forêt-habitations, réduction du bois mort dans les forêts aux alentours des habitations, ...).
- Quelles sont les expérimentations/recherches appliquées à réaliser ou données à fournir pour soutenir les mesures de renforcement de la résilience des forêts ?
 - Carte de la réserve en eau utile des sols ; suivi de l'humidité des sols. Des projets similaires sont déjà en cours d'expérimentation par LIST (Rambrouch) ou planifiés par l'AEV (projet Humus).
 - Plantations test avec des nouvelles essences (voir SRB) ; tests de provenance.
 - Analyse de l'état des essences exotiques et indigènes rares actuelles au Luxembourg.
 - Analyse et suivi de certaines populations d'essences indigènes plus résistantes (BU).
 - Conformité des nouvelles essences avec les besoins futurs en bois.
 - Quantification des dégâts de gibier en forêt (étude en cours à l'ANF).
- Quel est réellement l'effet de l'intensité des éclaircies sur le bilan hydrique des arbres ? Dans son mémoire de fin de stage, P.Merk (2022) note qu'il y a d'importantes différences de vue sur cette question dans les études scientifiques. Certaines études démontrent le renforcement de la résistance de nombreuses espèces d'arbres au stress hydrique par l'application de fortes éclaircies, notamment aussi pour les hêtraies (Diaconu et al., 2017; Sohn, Saha, et al., 2016 ; Gerhardt et al., 2016 ; Rais et al., 2014; Sohn, Hartig, et al., 2016 ; Aldea et al., 2017). D'autres études scientifiques plus récentes suggèrent une meilleure résistance au stress par la réduction de l'intensité des interventions (Welle et al., 2021a, 2021b ; Jandl et al., 2019; Mausolf et al., 2018).

5. Priorités des mesures lors de la mise en œuvre

Le choix des mesures à mettre en œuvre prioritairement dépend en grande partie de la situation initiale des peuplements forestiers (surfaces de coupe rase post-scolyte, peuplements jeunes ou d'âge moyen, vieux peuplements à régénérer, peuplements réguliers, peuplements pas en station, monocultures, etc). Malgré le fait que les différentes mesures sont en général mutuellement

complémentaires, il se fait que chaque situation initiale du peuplement demande d'abord l'application des mesures les plus appropriées.

Indépendamment des questions purement techniques, la priorisation des mesures va devoir prendre en compte les objectifs de gestion que le propriétaire s'est fixé pour sa forêt. En effet, chaque choix prioritaire d'une mesure va aussi avoir un impact direct sur la fourniture prioritaire des différents services écosystémiques.

Conclusions

Personne ne met plus en doute la nécessité de renforcer la résilience de nos forêts pour qu'elles puissent faire face aux incertitudes des perturbations climatiques futures et ainsi être capables de répondre aux besoins de nos sociétés. Dans sa publication sur la nécessité d'un changement de paradigme en matière de sylviculture, Christian Messier (2019) rappelle que « la résilience et la multifonctionnalité des forêts ne seront assurées que si ces dernières sont activement diversifiées et complexifiées ». Tous les scientifiques sans exception sont d'accord sur ce point.

Les mesures pour y parvenir sont nombreuses, bien identifiées et richement décrites dans de nombreuses publications. L'Administration de la nature et des forêts a choisi ce chemin depuis plus de 20 ans suite à la décision ministérielle de l'application d'une sylviculture proche de la nature dans les forêts publiques en 1999. Il est maintenant urgent et essentiel d'adapter et d'améliorer encore davantage les concepts et les mesures de cette sylviculture proche de la nature pour affronter les incertitudes grandissantes des nouvelles et futures conditions environnementales.

Le défi principal sera de trouver un juste équilibre entre les mesures de protection pour améliorer la capacité de résistance aux perturbations des arbres actuels et les mesures de diversification des structures, des essences et des provenances des arbres futurs pour éviter d'éventuels échecs à répétition d'une stratégie basée uniquement sur les capacités adaptatives de la régénération naturelle. Un nouveau mode de planification de la gestion forestière et une gestion dynamique et plus expérimentale (adaptive Waldmanagement) peuvent relever ce défi. Ils doivent être mis en place en alliant les savoir-faire des différents partenaires, en se donnant les moyens nécessaires et en privilégiant un accompagnement scientifique.

Les propriétaires et gestionnaires forestiers ne sont cependant pas sans moyens d'action. Un programme très diversifié d'aides d'Etat est actuellement disponible pour financer un grand nombre des actions suggérées dans ce rapport et faire en sorte que ces recommandations puissent être mises en œuvre dans toutes les forêts. Pour que ces moyens soient effectivement utilisés, il faut parallèlement renforcer la formation et améliorer et optimiser le conseil sur le terrain des propriétaires forestiers.

Il est également important de rappeler que les changements à opérer en matière de sylviculture proche de la nature vont avoir un impact non négligeable à moyen et long termes sur l'industrie du bois. Christian Messier (2019) conclut qu'on ne pourra plus gérer les forêts pour le besoin des industries, un concept qui ne fonctionne que dans un environnement stable et qui n'a d'ailleurs été appliqué que très accessoirement au Luxembourg. La nouvelle approche veut que la forêt produise ce qu'elle peut et l'industrie va devoir s'adapter.

Annexes

Annexe 1 : Alternative Baumarten als erfolgreiche Anpassungsstrategie im Klimawandel? Was wir wissen und was wir (noch) nicht wissen: Chancen und Risiken eines adaptiven Waldmanagements - Eine Literaturübersicht (mémoire de fin de stage, Philippe Merk, 2022).

Annexe 2 : Liste alphabétique des organisations qui ont participé au groupe de travail.

Administration de la Gestion de l'Eau
Administration de l'Environnement
Administration de la nature et des forêts
ASTA - service pédologique
Agence de l'Energie SA
Association des forestiers luxembourgeois
Association des universitaires au service de l'ANF
Bureau d'études EFOR-ERSA
Bureau d'études LIGNAFOR
Bureau d'études LUXPLAN
CGDIS
Chambre d'Agriculture
Chambre des Métiers
FEDIL
Fondation Hëllef fir d'Natur
FSC Lëtzebuerg asbl
FSHCL
Groupement forestier Wiltz
Lëtzebuerger Natur- a Vulleschutzliga
Lëtzebuerger Privatbëschr asbl
LIST
Luxinnovation - Woodcluster
Lycée Technique Agricole
MECDD
Ministère de l'Agriculture
Mouvement Ecologique
Musée National d'Histoire Naturelle
My Energy
Natur & Umwelt
Natur- & Geopark Mëllerdall
Naturpark Öewersauer
Naturpark Our
Oeko-fonds
Office National du Remembrement
Office National du Tourisme
Ordre des Architectes et des Ingénieurs-Conseils (OAI)
PEFC Luxembourg
Pro Silva Luxembourg asbl
SIAS
SNJ
Syvicol

Bibliographie

Brang Peter, Waldbauliche Strategien im Klimawandel in « Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. », BAFU Bern 2016

Genetic aspects linked to production and use of forest reproductive material, EUFORGEN-EFI 2021

Dynamic conservation and utilization of forest tree genetic resources - Indicators for in situ and ex situ genetic conservation and forest reproductive material, EUFORGEN-EFI 2020

Erwin Hussendörfer, Baumartenwahl im Klimawandel: Warum (nicht) in die Ferne schweifen?! In „Der Holzweg“, S213-233, OEKOM 2021

Lefèvre Francois et al. (2020), Valoriser et renforcer les mécanismes d'évolution génétique par la sylviculture, pour l'adaptation au changement climatique. Revue Forestière Française 5-2020, 383

Lindner Marcus, Adaptation to Climate Change in Sustainable Forest Management in Europe; Forest Europe 2020

Messier Christian et al., The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes, Forest Ecosystems 2019

Seidl Rupert, The Shape of Ecosystem Management to Come: Anticipating Risks and Fostering Resilience, BioScience overview articles, 2014

Seidl Rupert, Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services, Journal of Applied Ecology 2016