

# FORÊT

## • NATURE

n°  
164

OUTILS POUR UNE GESTION  
RÉSILIENTE DES ESPACES NATURELS



Tiré à part du Forêt.Nature n° 164 p. 28-34

### **LA MODÉLISATION COMME OUTIL D'ÉVALUATION DE LA RÉSILIENCE DES PEUPELEMENTS. PRÉSENTATION D'UNE ÉTUDE DE CAS AU BOIS DE LAUZELLE À LOUVAIN-LA-NEUVE**

Mathilde Bonheure, Frédéric André, Arthur Guignabert, Quentin Ponette, Mathieu Jonard (ELie, UCLouvain)





# La modélisation comme outil d'évaluation de la résilience des peuplements

## Présentation d'une étude de cas au Bois de Lauzelle à Louvain-la-Neuve

Mathilde Bonneure | Frédéric André | Arthur Guignabert | Quentin Ponette | Mathieu Jonard  
Earth and Life Institute, UCLouvain

Les forêts sont exposées de plus en plus fréquemment à des perturbations variées : les feux, les sécheresses, les insectes ravageurs, les tempêtes... Il est donc indispensable d'identifier des stratégies de gestion qui permettent d'augmenter la résilience des peuplements. Dans ce contexte, la modélisation constitue un outil efficace pour explorer l'impact de différents scénarios (gestion, perturbation, climat).





**Les** perturbations constituent un moteur de la dynamique forestière. Cependant, sous l'effet des changements globaux, leur intensité et leur fréquence pourraient augmenter, générant des impacts négatifs sur les services écosystémiques et provoquant de lourdes pertes financières pour les propriétaires.

Responsables d'environ 50 % des dégâts en forêt<sup>6</sup>, les tempêtes sont les perturbations les plus préjudiciables. Si elles ont contribué de tout temps à façonner l'hétérogénéité des paysages, leur intensité et leur fréquence pourraient s'accroître à l'avenir<sup>5</sup>. Les dommages liés au vent devraient, eux aussi, augmenter<sup>10</sup>. Pour faire face à ces risques, les itinéraires sylvicoles doivent être adaptés pour rendre les peuplements plus résilients.

La résilience est la capacité d'un système à revenir à son état initial après une perturbation. Un moyen de la caractériser est de la scinder en deux composantes : la résistance et le taux de récupération. La résistance est la capacité d'un système à absorber une perturbation sans subir de dégâts. Le taux de récupération est la vitesse à laquelle le système retourne à un état stable<sup>9</sup>.

À l'échelle d'un peuplement, il est possible d'atténuer l'impact de ces perturbations en agissant sur la structure et la composition spécifique des forêts, en diversifiant les classes d'âges ou de dimensions, et en associant des espèces pour augmenter la diversité et la redondance fonctionnelles<sup>3,8</sup>.

## Explorer la réaction des peuplements aux perturbations à l'aide de modèles

Afin de mieux comprendre l'impact de la gestion et des caractéristiques du peuplement (structure, composition spécifique) sur la résilience, la dynamique forestière a été simulée pour cinq peuplements contrastés

à l'aide du modèle HETEROFOR développé au sein du simulateur CAPSIS<sup>1</sup> (figure 1). Ce modèle décrit la régénération, la croissance et la mortalité des arbres en fonction de l'environnement local (approche individu-centrée et spatialement explicite) en se basant sur une description des processus écophysologiques. Pour pouvoir prédire l'évolution des peuplements sous un climat inédit, il est en effet essentiel de se baser sur une approche intégrant l'influence du climat sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers. La composante spatiale est également nécessaire pour décrire la dynamique forestière dans des peuplements de structure complexe. Ces deux spécificités du modèle HETEROFOR permettent notamment de l'utiliser pour tester de nouvelles pratiques sylvicoles afin d'améliorer la résilience des forêts dans un contexte d'environnement changeant. Ce modèle est en constante amélioration pour représenter de mieux en mieux le fonctionnement des forêts. En lien avec ce travail, un module tempête a été intégré pour pouvoir simuler les dégâts liés aux fortes rafales de vent.

## De la forêt au modèle : le bois de Lauzelle comme laboratoire

Dans le cadre d'un mémoire de fin d'étude<sup>2</sup>, la résilience des forêts face aux tempêtes a été évaluée grâce à la modélisation pour cinq peuplements du Bois de Lauzelle. Cette forêt périurbaine d'environ 200 hectares, propriété de l'UCLouvain, se situe sur la commune d'Ottignies-Louvain-La-Neuve, de Wavre et de Chaumont-Gistoux. Elle comprend 70 % de feuillus et 30 % de résineux. Les coupes s'y opèrent tous les 8 ans.

Les cinq peuplements choisis sont :

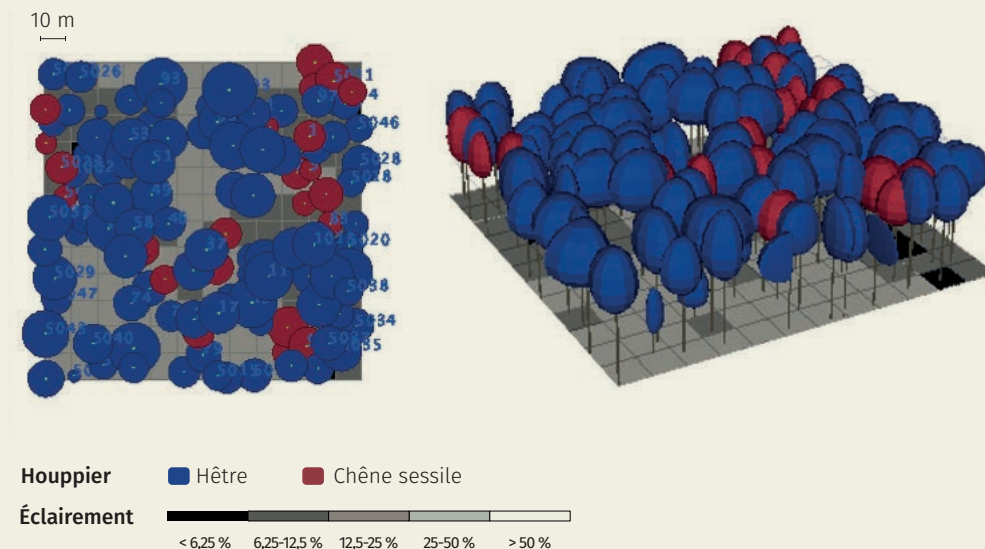
- Une vieille hêtraie régulière en phase de régénération.
- Une chênaie irrégulière.
- Un peuplement de pin régulier (107 ans).
- Deux peuplements irréguliers et mélangés de

## RÉSUMÉ

Les perturbations et particulièrement les tempêtes influencent la dynamique forestière. Sous l'effet des changements globaux, leur intensité et leur fréquence pourraient augmenter et éventuellement compromettre la fourniture des services écosystémiques. Pour faire face à ces risques, les itinéraires sylvicoles doivent rendre les peuplements plus résilients.

Afin de mieux comprendre l'impact de la gestion et des caractéristiques du peuplement (structure, composition spécifique) sur la résilience, la dynamique forestière a été simulée pour cinq peuplements contrastés à l'aide du modèle HETEROFOR. Au cours des simula-

tions, une tempête fictive a été générée afin d'évaluer la vulnérabilité au vent et la capacité de récupération de plusieurs types de peuplements traités selon différents modes de gestion (futaie régulière, futaie irrégulière, absence d'intervention). Les résultats obtenus montrent que la présence de régénération est un atout pour la récupération après perturbation. Celle-ci est favorisée dans le traitement en futaie irrégulière dont la stabilité est également renforcée par le prélèvement des gros bois plus sensibles aux tempêtes. Par contre, l'absence de gestion conduit à une forte accumulation de matériel sur pied et donc à une plus grande vulnérabilité.



**Figure 1.** Visualisation du peuplement de hêtres en 2D et 3D dans le modèle HETEROFOR.

hêtre, érable, frêne et chêne.

Pour les structures régulières, le choix s'est porté sur des peuplements âgés de manière à pouvoir influencer la phase de régénération lors des simulations. Des peuplements mélangés avec une structure complexe ont également été sélectionnés, car cette hétérogénéité est souvent considérée comme un gage de stabilité et est supposée conférer une bonne résilience<sup>7</sup>. Un inventaire spatialisé de chaque peuplement a été effectué en 2020-2021 sur une surface de 1 hectare à l'aide de l'outil *Field-map* pour initialiser les simulations.

Deux grands types de simulations ont été réalisées. Une première série de simulations a été effectuée pour évaluer l'effet de la structure et de la composition spécifique. Une tempête d'une intensité fixée (vitesse maximale de rafale de 155 km/h\*) a été générée sur les peuplements initiaux, et les dégâts associés (arbres renversés et cassés) ont été simulés. Ensuite, la résilience de ces peuplements a été évaluée en prolongeant les simulations sur une période de 24 années sans intervention.

Dans un second type de simulations, la dynamique des peuplements a été simulée selon trois modalités de gestion. Pour les peuplements de type régulier, les trois modalités de gestion sont le maintien du traitement en futaie régulière, l'irrégularisation progressive et l'absence de gestion. Pour les peuplements de type irrégulier, les trois modalités de gestion correspondent à trois intensités de prélèvement contrastées (0, 15 et 25 % maximum en surface terrière). Ces différentes modalités de gestion ont d'abord été ap-

pliquées durant 24 ans, soit 3 rotations. Ensuite, une tempête de même intensité que celle décrite ci-dessus a été générée. Enfin, durant une nouvelle période de 24 ans, les simulations ont été poursuivies sans intervention afin d'observer la capacité de récupération des différents peuplements.

Dans chaque cas, cinq indicateurs ont été suivis : la surface terrière, l'indice foliaire, la production primaire nette, l'évapotranspiration et un indice caractérisant la diversité spécifique (indice de *Simpson*). Pour chacun d'eux, nous avons caractérisé la réaction des peuplements aux perturbations à l'aide de différentes métriques :

1. La résistance équivaut au rapport entre l'indicateur après et avant perturbation.
2. Le temps de récupération est le temps nécessaire pour que l'indicateur retrouve sa valeur avant perturbation.
3. Le taux de récupération est égale à la différence entre l'indicateur avant et après perturbation rapportée au temps de récupération. Ce taux a ensuite été standardisé.
4. La résilience calculée en multipliant l'ampleur des dommages (différence entre l'indicateur avant et après perturbation) avec le temps de récupération (plus la valeur est petite, meilleure est la résilience). La résilience a également été standardisée pour avoir une valeur plus grande lorsque la résilience est meilleure.

\* La vitesse de rafale choisie correspond à celle observée lors de la tempête de janvier 1990 en Belgique et est parmi les plus élevées observées ces 50 dernières années.

Étant donné son influence sur de nombreux processus écophysologiques, nous avons choisi de centrer cet article sur l'évolution de l'indice foliaire (surface de feuilles du peuplement rapportée à la surface au sol).

## Quelques résultats

### Effet du type de peuplement (structure, composition spécifique) sur la résilience

L'évolution de l'indice foliaire des peuplements sous l'effet d'une tempête appliquée initialement, en 2022, est illustrée à la figure 3. La structure et la composition spécifique influencent non seulement la résistance instantanée des peuplements à la tempête mais également la manière avec laquelle ils récupèrent à plus long terme (figures 2 et 3).

Tout d'abord, la tempête a un effet immédiat que nous caractérisons ici par la résistance. Le peuplement de hêtre régulier est celui qui est le plus affecté par la tempête étant donné sa forte proportion de gros bois de hauteur élevée et la sensibilité au vent du hêtre. La chênaie irrégulière est le peuplement qui résiste le mieux. Cela s'explique par le fait que les arbres de ce peuplement sont répartis dans une large gamme de dimensions (structure irrégulière) et par un effet de protection lié à la présence d'arbres dominants. De plus, les caractéristiques intrinsèques du chêne (par exemple, la résistance à la flexion) lui confèrent une

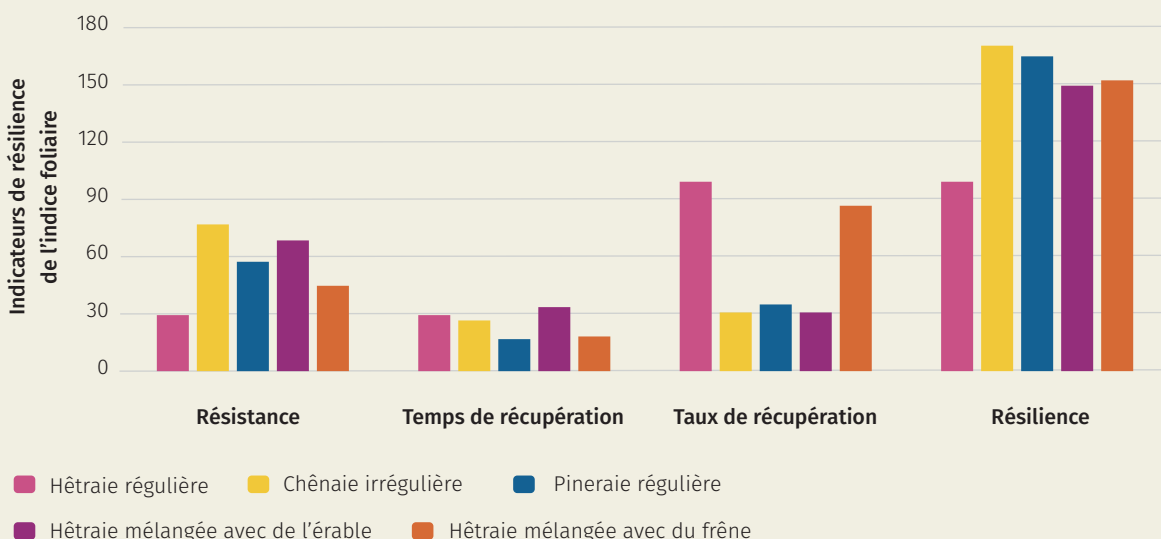
résistance accrue aux tempêtes par rapport au hêtre. Au sein des peuplements dominés par le hêtre, on remarque également que ceux présentant une structure irrégulière sont plus résistants. Ils sont toutefois comparés à un peuplement régulier qui se trouve au stade de développement le plus sensible du cycle sylvicole. La pineraie régulière a une résistance moyenne qui va néanmoins se détériorer au fur et à mesure que le peuplement vieillit.

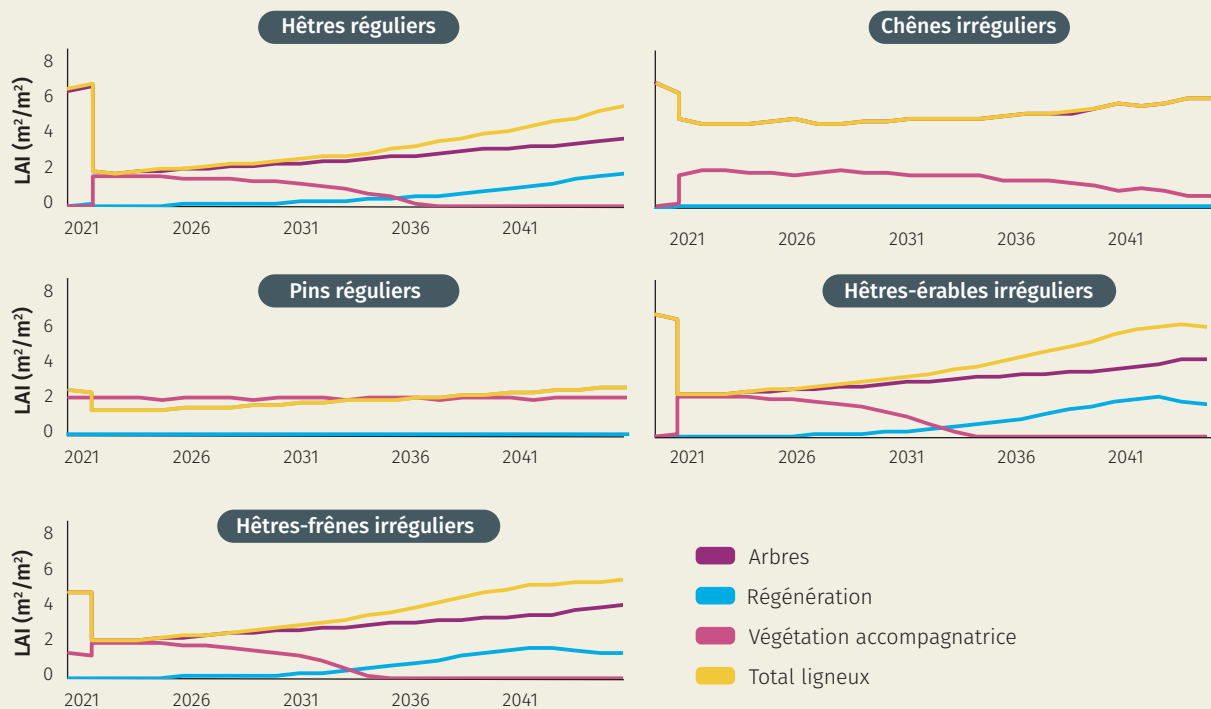
Le taux de récupération est plus important dans les peuplements ayant subi plus de dommages (hêtraie régulière et hêtraie mélangée) suite à l'apport de lumière dans le sous-bois. La régénération préexistante joue également un rôle au niveau de la récupération. Un peuplement avec une régénération plus développée aura tendance à avoir une récupération plus rapide. Le temps de récupération a tendance à être plus long dans les peuplements les plus impactés mais les différences entre peuplements sont moins marquées que pour la résistance et le taux de récupération car ceux-ci se compensent partiellement. Lorsqu'on intègre les différents aspects, la hêtraie régulière se démarque des autres peuplements par une résilience nettement plus faible que les autres peuplements, ce qui est directement lié au stade de développement avancé de celle-ci.

### Effet du mode de gestion sur la résilience

Nous nous intéressons maintenant aux simulations pour lesquelles la tempête a été appliquée après 24 années d'interventions, selon différents scénarios

**Figure 2.** Indicateurs de résilience de l'indice foliaire des différents peuplements à l'issue d'une perturbation appliquée initialement (2022). La résistance est la proportion du peuplement non endommagé par la tempête (%). Le temps de récupération est donné en année. Le taux de récupération et la résilience sont des indicateurs standardisés pour lesquels la hêtraie régulière a été considérée comme référence (valeur de l'indicateur = 100).





**Figure 3.** Évolution temporelle de l'indice foliaire (LAI en m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) des différents peuplements à l'issue d'une perturbation appliquée initialement (2022). Le LAI est individualisé pour les principales composantes de la végétation (arbres, régénération, végétation accompagnatrice).

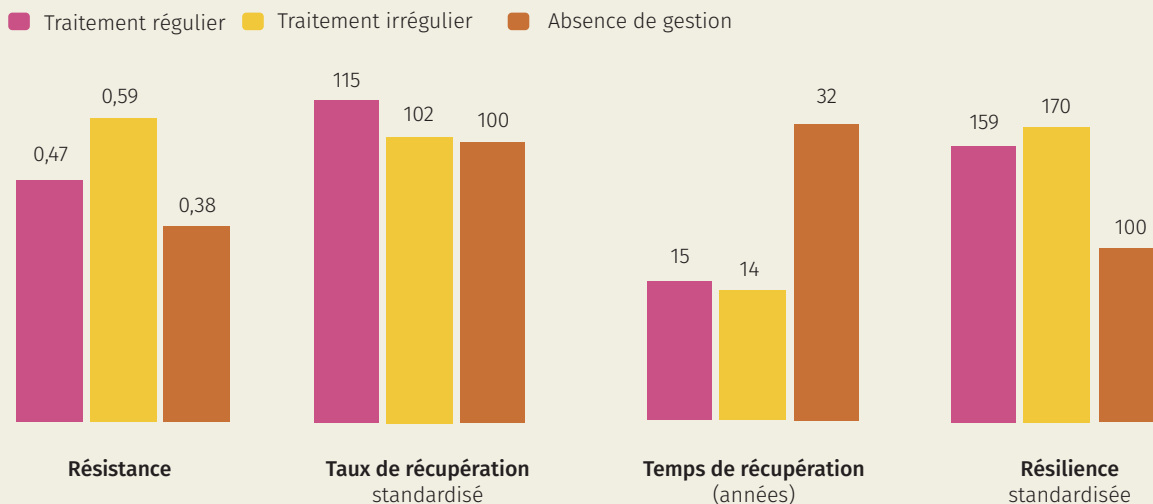
de gestion. Pour ce volet, nous nous limitons à l'analyse de la hêtraie traitée antérieurement en futaie régulière (figures 4 et 5). Sous l'angle de la résistance, la gestion en futaie irrégulière s'avère la plus favorable alors que le laisser-faire (non gestion) est associé au taux de dégât instantané le plus élevé ; la gestion régulière conduit à un résultat intermédiaire (figure 4). En prélevant préférentiellement les individus dominants, plus sensibles aux tempêtes en raison de leur hauteur totale supérieure, la gestion en futaie irrégulière augmente donc la résistance du peuplement. En futaie régulière, les coupes s'opéraient dans toutes les catégories de circonférences (coupe mixte), laissant plus d'individus sensibles au vent qu'en futaie irrégulière. Enfin, ces grands arbres ont été maintenus dans le mode de gestion sans intervention (excepté l'un ou l'autre chablis ou dépérissement lié à l'âge), ce qui explique la sensibilité plus grande de ce mode de gestion.

Les peuplements gérés (traitements en futaie régulière et irrégulière) montrent un temps de récupération deux fois plus court (14-15 ans) que le peuplement non géré (32 ans). Cela peut s'expliquer par le fait que les peuplements gérés ont une meilleure résistance (peuplement traité en futaie irrégulière) ou un taux de récupération plus élevé (peuplement traité en futaie régulière). Le peuplement sans gestion

combine une résistance plus faible avec un taux de récupération plus bas et donc le temps de récupération est plus important.

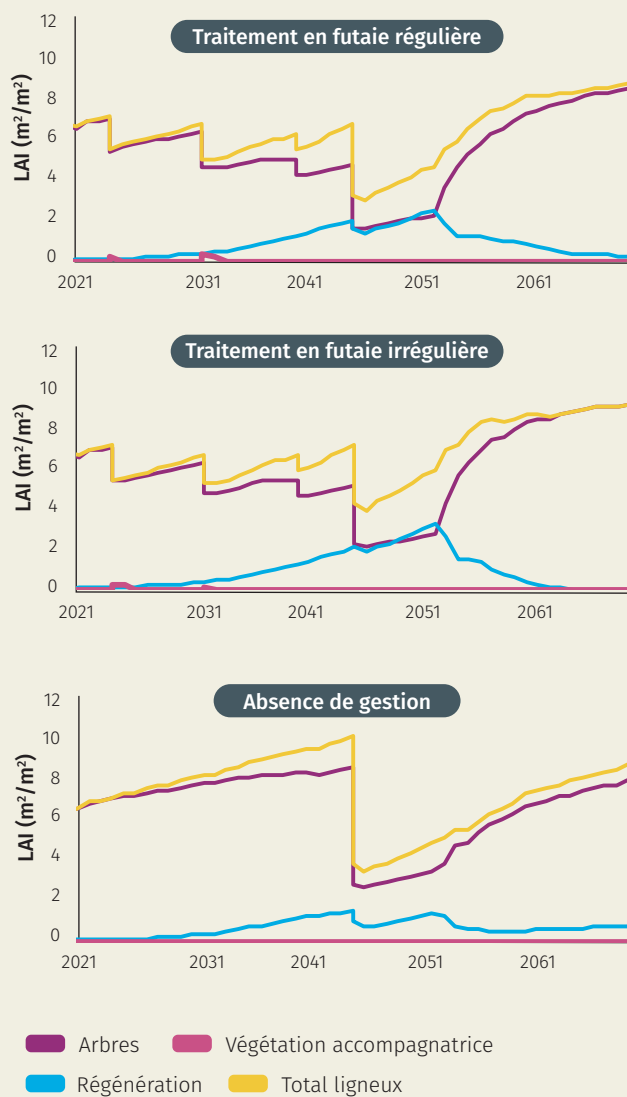
Les simulations ont également montré que le traitement en futaie régulière a eu un meilleur taux de récupération que celui en futaie irrégulière et qu'en l'absence d'intervention (figure 4). Ce taux de récupération est influencé notamment par la capacité du peuplement à se régénérer. Cela dépend des cohortes de régénération préexistantes, des conditions de luminosité du sous-bois et de la tolérance à l'ombrage de l'essence. Aussi, plus la perturbation est importante, plus l'apport de lumière l'est et donc plus la régénération aura tendance à se développer. Pour le cas du peuplement de hêtres réguliers, le traitement en futaie régulière présentait le meilleur compromis entre régénération préexistante et augmentation de l'apport de lumière.

En considérant la résilience standardisée, qui intègre l'ensemble des composantes de la résilience, l'absence de gestion apparaît en définitive comme l'option la moins favorable dans le cas du peuplement régulier de hêtres. Les deux modalités de gestion simulées sont nettement plus favorables sous l'angle de la résistance et de la récupération, avec un léger avantage global pour le traitement irrégulier



**Figure 4.** Impact d'une tempête sur la stabilité au vent d'une hêtraie mature régulière conduite pendant 24 ans selon trois modes de gestion contrastés (futaie régulière, futaie irrégulière, absence d'intervention).

**Figure 5.** Évolution temporelle de l'indice foliaire (LAI en  $m^2/m^2$ ) des principales composantes de la végétation selon différents scénarios de gestion appliqués au peuplement de hêtres réguliers. La perturbation est initiée après 24 années de gestion ; tous les peuplements évoluent ensuite sans intervention.



## POINTS-CLEFS

- ▶ La régénération joue un rôle moteur dans la récupération après une perturbation.
- ▶ Le traitement en futaie irrégulière réduit la sensibilité au vent par prélèvement des gros bois et améliore la capacité de récupération en stimulant la régénération.
- ▶ La modélisation fournit un cadre solide pour analyser l'effet de la gestion sur la résilience des peuplements.

(figures 4 et 5).

### Premiers enseignements et perspectives

En nous appuyant sur un modèle capable de représenter des peuplements complexes et d'intégrer les principaux facteurs bio-physiques affectant la dynamique forestière, nous avons pu évaluer l'impact d'une tempête sur la stabilité de peuplements contrastés et identifier quelques facteurs clés.

La gestion forestière a une forte influence sur la façon dont nos forêts font face aux tempêtes. Dans le cas particulier que nous avons traité, le traitement en futaie irrégulière conduisant au prélèvement progressif des gros bois arrivés au terme d'exploitabilité semble être une bonne manière de renforcer la résilience.

Les facteurs qui vont déterminer la résilience des forêts face aux tempêtes sont les traits des espèces, la hauteur des arbres et la régénération. Il est possible de contrôler cela via le choix des espèces, le type et l'intensité des coupes. En effet, les caractéristiques intrinsèques comme la résistance à la flexion influencent la résistance face aux vents. La hauteur a un effet sur le point de flexion de l'arbre : plus il sera haut, plus l'arbre sera vulnérable face aux vents. La régénération affecte la capacité de récupération des peuplements : plus il y a de régénération, plus le peuplement pourra revenir à un état initial.

Ces résultats sont valables pour un type de peuplement, une perturbation d'une certaine intensité qui arrive à un moment donné du cycle sylvicole. Pour pouvoir être généralisés, d'autres simulations devraient être réalisées afin d'analyser d'autres types de peuplements (en termes de structure, de composition spécifique et de stade de développement), et d'autres intensités de perturbations.

Dans un contexte marqué par une forte incertitude et des pressions accrues sur les forêts, un modèle tel qu'HETEROFOR constitue un outil intéressant pour évaluer l'impact des changements globaux, et proposer des pistes de réflexion aux gestionnaires. ■

## Bibliographie

- <sup>1</sup> André F., de Wergifosse L., de Coligny F., Beudez N., Ligot G., Gauthray-Guyenet V., Courbaud B., Jonard M. (2021). Radiative transfer modeling in structurally complex stands : Towards a better understanding of parametrization. *Annals of Forest Science* 78(4) : 92. 
- <sup>2</sup> Bonheure M. (2022). *Effets des caractéristiques du peuplement et du traitement sylvicole sur la résilience des forêts face aux tempêtes dans le contexte du changement climatique*. Travail de fin d'étude UCLouvain, Faculté des bioingénieurs, prom. : Ponette Q., Jonard M., 108 p. 
- <sup>3</sup> Claessens H. (2016). Quelques considérations pour adapter nos forêts aux changements climatiques. *Silva Belgica* 1/2016 : 20-29. 
- <sup>4</sup> Drouineau S., Laroussinie O., Birot Y., Terrasson D., Formery T., Roman-Amat B. (2000). Expertise collective sur les tempêtes, la sensibilité des forêts, et sur leur reconstitution. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 41 : 57-77. 
- <sup>5</sup> Duvernoy J. (2022). Panorama en Europe et en France des effets présents et à venir du changement climatique. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* 106(2) : 21-26.
- <sup>6</sup> Gardiner B., Orazio C., Castro A., Clabat D. (2021). *Gestion du risque tempête en Nouvelle Aquitaine : Guide technique : Pour les aménageurs du territoire et les aménagistes forestiers*. Plurifor, 51 p. 
- <sup>7</sup> Messier C., Bauhus J., Doyon F., Maure F., Sousa-Silva R., Nolet P., Mina M., Aquilué N., Fortin M.-J., Puettmann K. (2019). The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems* 6(1) : 21. 
- <sup>8</sup> Messier C., Bauhus J., Sousa-Silva R. et al. (2021). For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! *Conservation Letters* 15(1) : e12829. 
- <sup>9</sup> Nikinmaa L., Lindner M., Cantarello E., Jump A. S., Seidl R., Winkel G., Muys B. (2020). Reviewing the use of resilience concepts in forest sciences. *Current Forestry Reports* 6(2) : 61-80.
- <sup>10</sup> Seidl R., Schelhaas M.-J., Lexer M. J. (2011). Unraveling the drivers of intensifying forest disturbance regimes in Europe. *Global Change Biology* 17(9) : 2842-2852.

**Crédit photo.** M. Bonheure (p. 28).

**Mathilde Bonheure**

**Frédéric André**

**Arthur Guignabert**

**Quentin Ponette**

**Mathieu Jonard**

mathieu.jonard@uclouvain.be

Earth and Life Institute, UCLouvain

Croix du Sud 2/L7.05.04 | B-1348 Louvain-la-Neuve