

Dégradation forestière (Forest Degradation)

Présentation

Objectif

L'objectif du modèle est d'explorer les différents comportements anthropiques (artificialisation et exploitations forestières) et biophysiques (incendies et maladies) sur la dégradation des forêts. Il s'agit de comprendre et de mesurer les impacts de ces processus sur la dégradation des systèmes forestiers. En effet, si depuis le XIX^e siècle la consommation de bois s'est accentuée avec les révolutions industrielles en France (Levillain, 2023). Cette tendance reste encore d'actualité même si la situation diverge selon les localisations. À l'échelle mondiale, le volume forestier aurait diminué de 178 millions d'hectares en 30 ans (FAO, 2020). Cependant certains pays possèdent une croissance positive du volume forestier. C'est le cas de la France qui a vu son volume forestier augmenter de 21 % depuis 1985 (IGN, 2022). Une chose est certaine, les pressions que subissent les forêts, qu'elles soient anthropiques ou biophysiques (influencées par le changement climatique), n'ont fait qu'augmenter (ONU, 2024). De ce fait, les forêts sont de plus en plus vulnérables face à ces perturbations, ce qui les rend moins résilientes (Guerin-Turcq, 2023). Les processus de dégradations anthropiques des forêts se composent essentiellement de l'agriculture intensive et des opérations de remembrement, du développement des réseaux de transport et des infrastructures routières associées, de l'urbanisation croissante (Aguéjdad, 2011). Pour les facteurs biophysiques, ce sont davantage les maladies et les incendies (Bouisset, 2021) qui sont des facteurs de dégradation de la forêt, cependant ils peuvent être amplifiés par la surexploitation des systèmes forestiers qui aurait un “effet cascade” (Hasan, 2019). Cependant, dans certains cas précis, la dégradation forestière peut s'atténuer et même augmenter. C'est le cas si une zone artificialisée subit une déprise économique comme à Detroit, USA (Locke, 2018), ou encore si des politiques sont mises en place pour limiter le taux d'artificialisation (Maienza, 2021)

De ce fait, le modèle s'intègre parfaitement dans les tendances actuelles afin de montrer d'une façon globale comment les différents processus de dégradations agissent les uns avec les autres et comment ils peuvent être bloqués, voir même dépassés par la régénération forestière.

Le modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- Les incendies constituent un facteur plus important que les maladies pour la dégradation des forêts.
- Les perturbations comme les maladies ou les incendies peuvent faciliter l'artificialisation, permettant aux activités humaines de s'implanter plus facilement sur des zones auparavant forestières.
- L'artificialisation des sols, l'exploitation forestière ainsi que les incendies augmentent la fragmentation et la déstructuration des forêts, dépassant potentiellement leur capacité naturelle de régénération.

Ces hypothèses ont guidé la simulation, ce qui permettra par la suite d'interpréter les potentielles conséquences écologiques observées.

En faisant varier les paramètres liés à l'artificialisation, aux incendies, aux maladies, à l'exploitation et à la régénération, le modèle vise à identifier les conditions dans lesquelles les forêts se fragmentent ou, au contraire, parviennent à se régénérer et à se reconnecter.

Entitiées

Le modèle est un agent-based model de type cellulaire. Les agents sont représentés par des *patches*, chacun caractérisé par un état dynamique (*zone-type*) qui est associé à une couleur (attribut *pcolor*) : artificialisé, non artificialisé, forêt, forêt abimée.

Certains patches ont une variable supplémentaire (*cause-dégradation*) indiquant la cause de transformation : exploitation ; feu ; maladie.

Tous les agents sont localisés par des coordonnées (*xcor* et *ycor*).

Echelle

L'environnement du modèle est composé de trois grandes zones : forêts, zones artificialisées et zones non artificialisées. Il est caractérisé par deux images raster PNG. La taille globale de l'environnement est de 10 km par 10 km, une échelle assez vaste pour identifier à la fois des zones artificialisées et forestières, et pour observer les interactions entre ces zones. La résolution est de 20 m par 20 m, inférieur à la précision des données sources, offrant à la fois une bonne précision et une optimisation des performances de calcul. Ces valeurs sont couramment utilisées lors des travaux de télédétection (Hasan, 2019).

En ce qui concerne l'échelle temporelle, un tick correspond à un an. Le modèle a une limite temporelle de 20 ans afin de simuler de manière réaliste les différents processus pouvant dégrader ou régénérer la forêt. Le choix de 20 ans est toujours en lien avec les travaux d'analyses des changements forestiers réalisés par télédétection qui sont de l'ordre de 15 ans (Aguejda, 2011 Hasan, 2019, Proisy, 2014).

Variables d'état

Dans le modèle, chaque agent-patch possède des caractéristiques initiales qui peuvent évoluer dynamiquement pendant la simulation.

Les variables d'état sont : *foret-id* (identifiant du fragment forestier), *zone-type* (forêt, forêt abîmée, artificialisé, non artificialisé) et *cause-degradation* (exploitation, feu, maladie ou vide).

Entité	Nom variable	Possible valeur	Commentaire
Patch	pcolor	{ grey - 2, orange, green, lime +3 }	Couleur de la parcelle correspondant à son état : forêt artificielle, forêt non artificielle, forêt intacte ou forêt dégradée
	foret?	{ true, false }	Indique si la parcelle correspond à une forêt intacte
	artificialise?	{ true, false }	Indique si la parcelle correspond à une zone artificielle
	zone-type	[artificialise, non-artificialise, foret, foret-abimee]	Indicates whether the patch corresponds to an artificialized area
	foret-id	[1, X]	État dynamique de la parcelle utilisé dans toutes les procédures du modèle
Paramètres	artificialization-extension-origin	[0, 25]	Identifiant du fragment forestier, utilisé pour calculer la taille et la fragmentation
	exploitation-origin	[0, 25]	Pourcentage annuel initial de conversion en zones artificielles (valeur à l'état initial)
	min-number-disease	[0, X]	Pourcentage annuel initial de forêt dégradée par l'exploitation (valeur à l'état initial)
	max-number-disease	[0, X]	Nombre minimum de foyers de maladie créés par tique
	disease-ray	[0, 1000]	Nombre maximum de foyers de maladie créés par tique
	min-number-fire	[0, X]	Rayon d'impact de la maladie autour du foyer, en mètres
	max-number-fire	[0, X]	Nombre minimum de foyers d'incendie créés par tique
	regeneration-colonisation-origin	[0, 25]	Nombre maximum de foyers d'incendie créés par tique
	critical-forest-threshold	[0, 100]	Pourcentage annuel initial de régénération/colonisation des parcelles forestières dégradées (valeur à l'état initial)
			Seuil forestier critique : en dessous de ce pourcentage, l'artificialisation est stoppée

Tableau 1 : Résumé des variables d'état et des paramètres. Source : Liegeon Théo, Bayel Lisa, Fatouaki Boutayna, Zazenezhad Niloofar, Schlick Vincent (2025)

Processus et ordonnancement

À chaque tick (correspondant à une année simulée), les processus suivants s'exécutent dans cet ordre précis :

1. **Artificialisation :**

Les zones non artificialisées peuvent être transformées en zones artificialisées via la procédure (*expansion-artificialisation*).

2. **Exploitation forestière :**

Les exploitations dégradent les patchs forestiers en fonction de la proximité d'autres zones exploitées, via la procédure (*exploitation*).

3. **Maladies :**

Des foyers infectieux se forment avec une taille définie, affectant les patchs de forêt situés dans le rayon correspondant, via la procédure (*disease*).

4. **Incendies :**

L'apparition et l'extension des incendies sont gérées à partir de foyers sources via la procédure (*fire*).

5. **Régénération et colonisation forestière :**

Les patchs forestiers abîmés peuvent se régénérer aléatoirement pour redevenir des patchs de forêt intacts.

Si l'ensemble de la forêt est régénéré, la colonisation s'étend sur les patchs non artificialisés ou artificialisés via la procédure (*regeneration*).

La simulation s'arrête automatiquement après 20 ticks (20 ans).

Éléments de conception (Design concepts)

Principes de base

Le modèle tend à modéliser la dynamique forestière, notamment l'équilibre entre les perturbations humaines (exploitations forestières et artificialisation) et biophysiques (incendies, maladies) et la régénération/colonisation des forêts. Les perturbations humaines dépendent des surfaces disponibles, tandis que les perturbations biophysiques se propagent localement et de manière aléatoire.

Emergence

Dans ce modèle, plusieurs phénomènes spatiaux et dynamiques émergent des interactions locales entre les patchs représentant les différentes zones du paysage.

Les principaux phénomènes émergents sont :

- **Fragmentation du couvert forestier**, résultant des processus successifs de dégradation (*exploitation, fire, disease*) et d'(*expansion-artificialisation*).
- **Variation de la taille et du nombre de massifs forestiers**, reflétée par l'évolution de l'*indice-fragmentation* et la distribution des surfaces forestières (*taille-foret*) (petits îlots isolés aux grandes forêts continues).
- **Formation de motifs spatiaux hétérogènes**, issus des logiques locales de propagation (voisinage, rayon d'influence) et de régénération stochastique via le processus (*regeneration*).
- **Équilibre dynamique entre dégradation et régénération**, où la forêt perd de la surface sous l'effet des pressions humaines (*exploitation, expansion-artificialisation*) et naturelles (*fire, disease*), mais regagne du couvert via la recolonisation aléatoire et la déprise agricole (*regeneration*).

Ces dynamiques émergent sans intervention externe : elles résultent uniquement des règles locales définies pour chaque patch et de leurs interactions spatiales, telles qu'implémentées dans les variables et processus du modèle.

Adaptation

Dans ce modèle, les patches n'adoptent pas activement leur comportement de manière autonome, mais les processus d'évolution du paysage intègrent des formes implicites d'adaptation liées aux conditions locales et au contexte spatial.

Le processus (*expansion-artificialisation*) s'adapte à la disponibilité spatiale des différentes catégories de zones (*zone-type*).

Il suit un ordre de priorité dynamique : si les zones non artificialisées ne sont plus disponibles, l'expansion se reporte automatiquement sur les patches de forêt abîmée, puis sur les forêts intactes.

Cette règle traduit une adaptation socio-économique : plus la surface est dégradée, plus son coût d'artificialisation est faible.

Le processus (*exploitation*) s'adapte au voisinage existant : les zones d'exploitation, bien que localisées de façon sporadique, ont tendance à se regrouper, favorisant la continuité spatiale et la concentration des activités.

De même, le processus (*regeneration*) s'ajuste à la disponibilité des surfaces colonisables.

Si toutes les forêts abîmées ont été restaurées, la régénération se reporte sur les zones non artificialisées, puis éventuellement sur certaines zones artificialisées (notamment agricoles). Ces mécanismes permettent d'illustrer la capacité d'un système à retrouver un équilibre lorsque la déforestation ralentit ou que la pression anthropique diminue.

Même sans agents "intelligents", le modèle représente une adaptation structurelle et spatiale du paysage, où chaque processus ajuste ses effets en fonction de la configuration courante du territoire.

Ainsi, ces règles permettent de reproduire des dynamiques réalistes de transition entre dégradation et restauration, et d'illustrer la compétition permanente entre artificialisation et régénération des forêts.

Apprentissage

Le modèle n'inclut aucun apprentissage.

Estimation

Le modèle ne dispose pas de mécanisme d'estimation ou d'anticipation explicite. Les patches n'exécutent pas d'estimation future : leurs transitions d'état sont déterminées de façon réactive par des règles locales et des probabilités stochastiques (cf partie stochasticité).

Les patches soumis au processus exploitation (*exploitation*) sélectionnent aléatoirement un patch forestier et appliquent une probabilité d'abîmer ce patch plus élevée si un voisin immédiat est déjà exploité (effet d'entraînement local).

La maladie (*disease*) et le feu (*fire*) se propagent à partir de foyers choisis aléatoirement, couplés à des probabilités locales (propagation dans un rayon donné pour la maladie et propagation en chaîne pour le feu).

Pour finir, la régénération/colonisation forestière (*regeneration*) convertit des patches abîmés en forêt saine en fonction de la surface forestière disponible. Si la proportion de patches à régénérer dépasse les forêts abîmées, la régénération s'étend aux zones non artificialisées et aux patches voisins des forêts, pouvant inclure des zones artificialisées.

Par conséquent, le comportement global peut montrer des tendances spatiales qui ressemblent à de l'anticipation (ex. propagation concentrée), mais il n'y a pas de calcul ou mémorisation d'états futurs, ni de prise de décision basée sur une prédiction explicite.

Stochasticité

Le modèle contient une part d'aléatoire dans l'initialisation mais aussi dans les dynamiques, spécifiquement dans les zones forestières. Plus précisément sur les processus liés à la dégradation des forêts. En effet, seule la localisation des incendies est aléatoire (*fire*). Il en est de même pour les maladies (*disease*) et pour l'implantation des exploitations (*exploitation*). Un seul critère est à noter sur les apparitions aléatoires : elles doivent être comprises dans la zone de 10 km².

Plus précisément, nous analyserons les trois processus de dégradation qui sont soumis à une part d'aléatoire :

Pour les incendies, la part d'aléatoire résulte d'un nombre de feux pris aléatoirement dans une échelle de valeur avec un minimum (*min-number-fire*) et un maximum (*max-number-fire*). Enfin, leur localisation est elle aussi aléatoire tout en étant dépendante des patches de forêts (les feux ne pouvant pas apparaître dans les patches artificialisés, ni non artificialisés ou forêts abîmées).

L'aspect aléatoire sur l'apparition, sa propagation et le nombre de feux permet de reproduire une vision plus authentique des phénomènes qui peuvent se produire dans la réalité.

Pour les maladies, l'aléatoire apparaît deux fois. Le processus est similaire à celui des incendies. La part d'aléatoire résulte d'un nombre de maladies prises aléatoirement dans une échelle de valeur avec un minimum (*min-number-disease*) et un maximum (*max-number-disease*). Il en est de même pour la localisation des maladies, qui est désignée aléatoirement sur les patchs de type forêt. Elles ne peuvent apparaître que sur les patchs de forêt. Enfin, pour terminer, la propagation des maladies s'effectue dans un rayon précis (*disease-ray*) et dans ce rayon 50 % des patchs présents, choisis de façon aléatoire, vont devenir de la forêt abimée.

Pour terminer, concernant les exploitations forestières, la part d'aléatoire passe par deux processus. Le premier est sa localisation spatiale au début du modèle : les patchs sont sélectionnés aléatoirement dans des zones de type forêt. Si une exploitation est dans ses voisins immédiats, alors elle a 100 % de chances de s'implanter (passer d'un patch forestier à un patch abîmé). Au contraire, si le patch sélectionné n'a pas de voisin immédiat, il n'a que 5 % de chances de s'implanter. Ce processus se répète jusqu'à atteindre le quota annuel en lien avec la surface de forêt.

De ce fait, dans le modèle, la stochasticité agit sur le nombre, les localisations et la propagation des dégradations forestières. Elle permet de représenter la part des aléas naturels qui peuvent impacter les patchs forestiers (incendies et maladies) mais aussi les processus anthropiques (exploitations).

Collectifs

Dans le code, le partage des identifiants se fait grâce à la procédure (*definir-groupe*). Cette procédure parcourt tous les patchs et regroupe ceux connectés spatialement et possédant les mêmes caractéristiques.

Les collectifs ne sont pas fixes, ils peuvent à chaque pas de temps être modifiés. Ils peuvent disparaître, fusionner ou se fragmenter en fonction des processus de dégradation tels que les incendies, les maladies, les exploitations et l'artificialisation.

Les influences des collectifs ne sont pas purement descriptives, elles influencent directement certains processus du modèle, notamment la régénération, dont le taux dépend de la structure collective du paysage forestier. Par exemple, plus une forêt est dégradée, voire fragmentée avec un nombre important de patch isolés, plus sa régénération diminue. Les collectifs constituent dans le modèle la structure émergente mais ils servent aussi la structure dynamique des boucles de rétroaction.

Le modèle permet de calculer plusieurs indicateurs à partir de ces collectifs, tels que le nombre total de forêts (*nb_forets*), la taille médiane (*taille_med*), minimale (*taille_max*) et maximale (*taille_min*) des forêts, ainsi qu'un indice de fragmentation (*indice_fragmentation*).

Observation

Ce modèle simule la dégradation forestière sur une période de 20 ans. Il suit l'évolution de la surface des quatre types de patches : forêt (*foret*), forêt abîmée (*foret-abimee*), zone artificialisée (*artificialise*) et zone non artificialisée (*non-artificialise*). Il montre aussi l'évolution des surfaces forestières dégradées selon la cause : exploitation (*exploitation*), maladies (*disease*) et incendies (*fire*), ainsi que de la surface des forêts régénérées (*regeneration*).

Le modèle rend également compte du nombre de dégradations au cours du temps pour les incendies (*fire*) et les maladies (*disease*). Il suit aussi le nombre de forêts distinctes (*nb_forets*) et l'évolution de leur taille médiane, minimale et maximale (*taille_med*, *taille_min*, *taille_max*).

Il permet aussi de suivre l'évolution annuelle des pourcentages liés à chaque processus à travers les variances (*variance-artif*, *variance-exploite*, *variance-regeneration*), illustrant la variation de l'intensité des phénomènes d'artificialisation, d'exploitation et de régénération.

Enfin, le modèle calcule un *indice de fragmentation* (*indice_fragmentation*) chaque année, défini comme le rapport entre le nombre de fragments de forêts distincts et la surface forestière totale. Un indice élevé traduit une forte fragmentation, tandis qu'un indice faible indique une forêt plus continue.

Détails

Initialisation

Le modèle commence par créer un espace vide de taille 500 x 500 et une durée de 20 ticks (1 tick = 1 année). Ensuite, il charge les données d'entrée : deux images raster représentant la forêt et les zones artificialisées. Chaque patch reçoit au lancement de la simulation les propriétés suivantes : *foret?* (indique si le patch correspond initialement à de la forêt) et (*"artificialise?"*) (indique si le patch correspond initialement à une zone artificialisée). Les patches qui ne sont ni forêt ni artificialisés sont automatiquement classés comme zones non artificialisées, complétant ainsi la carte initiale du paysage. Ces informations permettent de fusionner les deux cartes en une seule carte initiale.

Données d'entrées

Les données utilisées pour initialiser le modèle proviennent de l'occupation des sols du Grand Est, retravaillées. Seules les deux premières classes de la classification ont été conservées pour simplifier l'initialisation (*foret?* et *artificialise?*). Ces données servent à créer les patches initiaux (et à calculer les indicateurs de surface et de fragmentation). Les rasters ont été générés via un Model Builder (cf. model builder QGIS [Github](#)) pour obtenir les deux images en entrée.

Sous-modèles

L'ensemble des sous modèles de cette simulation agissent séparément des uns des autres. Chaque paramètre est défini en début de simulation.

Exploitation forestière

Ce paramètre simule la dégradation de la forêt par l'exploitation humaine (*exploitation*). Le pourcentage d'exploitation forestière de base est défini par un slider en début de simulation (*exploitation-origin*), mais il est ajusté à chaque tick en fonction de la proportion de forêt restante par rapport à la forêt initiale (*coef-foret*), reflétant la variation de la pression de l'exploitation selon la disponibilité de la ressource.

La première année, les exploitations se répartissent aléatoirement sur des patches de forêt intacte (*zone-type* = "*foret*"). Pour reproduire la tendance naturelle à regrouper les exploitations, un patch avec au moins un voisin déjà abîmé par exploitation (*proba-collé*) à 100 % de chances d'être abîmé ; s'il est isolé (*proba-isole*), il n'a que 5 % de chances.

Chaque patch abîmé devient alors *foret-abimee* avec *cause-degradation* = "*exploitation*". Le modèle comptabilise le nombre de patches abîmés par cette cause (*nb-arbre-abimer-exploitation*). Le quota de patches à abîmer pour chaque tick est calculé en multipliant le pourcentage ajusté (*variance-exploite*) par le nombre total de patches forestiers disponibles.

Maladie

Les maladies simulent le nombre de foyers infectieux qui touchent la forêt (*disease*). Elles illustrent que les forêts peuvent se dégrader par des causes biochimiques sans lien anthropique. Les foyers infectieux peuvent être déclenchés par des insectes parasites (comme les scolytes affectant les résineux) ou par des bactéries (comme la bactériose affectant l'olivier). Chaque foyer est fixe (ne se déplaçant pas) et temporaire (ne durant qu'un seul tick), même si la forêt peut rester abîmée longtemps faute de régénération (*regeneration*).

Les foyers sont créés aléatoirement sur des patches de forêt saine (*zone-type* = "*foret*").

- Le nombre de foyers (*n-centre-maladie*, défini par *min-number-disease* et *max-number-disease*) est tiré au hasard.
- Le rayon d'infection (*disease-ray*) détermine quels patches voisins sont concernés.
- Chaque patch dans le rayon à 50 % de chances de devenir malade et passe de ("*foret*") à ("*foret-abimee*"), avec la cause de dégradation marquée comme *maladie* (*cause-degradation* = "*maladie*").

Chaque foyer dure un seul tick, la propagation est locale et instantanée.

- Le nombre total de patches abîmés par maladie est mis à jour (*nb-arbre-abimer-maladie*).

Incendie

Les incendies reproduisent dans ce modèle les feux de forêt déclenchés aléatoirement (*fire*). Bien qu'en réalité un feu puisse être favorisé par certaines conditions (sécheresse, comportement humain...), le modèle simule ici une chance aléatoire de survenue.

Le nombre minimal et maximal de foyers par tick (*min-number-fire*, *max-number-fire*) est défini en entrée du modèle. Un nombre aléatoire de foyers est tiré entre ces deux valeurs (*n-centre-feu*).

Les foyers se déclarent aléatoirement sur des patches de forêt intacte (*zone-type* = "*foret*"). Les patches touchés deviennent ("*foret-abimee*") avec *cause-degradation* = "*feu*".

Chaque foyer peut se propager sur ses voisins immédiats (patches de forêt intacte) avec 50 % de chances, créant ainsi de nouveaux foyers pour le tick courant.

Le nombre total de patches brûlés est mis à jour à la fin du tick (*nb-arbre-abimer-feu*).

Régénération et extension de la forêt

Après le passage d'une perturbation (*incendie*, *maladie*, *exploitation humaine*), la forêt se régénère. Dans ce modèle, le temps de régénération est identique quelle que soit la perturbation.

Le pourcentage de régénération (*regeneration-colonisation-origin*) est défini en début de simulation via un slider, illustrant la résilience de la forêt aux perturbations. Le modèle calcule la surface totale de forêt à régénérer (*zone-type* = "*foret-abimee*") et sélectionne aléatoirement les patches à restaurer selon ce pourcentage. La régénération est modulée par un coefficient de régénération (*coef-regen*), calculé à partir de la fragmentation actuelle des forêts ($nb_forets / nb_forets_debut$) et de la taille médiane des massifs forestiers ($taille_med / taille_med_debut$). Cela permet de limiter la régénération si la forêt est très fragmentée ou si les massifs sont trop petits.

Les patches régénérés deviennent des patches de forêt saine (*zone-type* = "*foret*"), et leur historique de dégradation (*cause-degradation*) est réinitialisé, leur permettant de subir de nouvelles perturbations.

Si tous les patches forestiers sont intacts et qu'il n'y a plus de patches abîmés, la forêt peut coloniser de nouvelles zones. Elle s'étend d'abord sur les patches non artificialisés (*zone-type* = "*non-artificialise*"), illustrant la déprise agricole. Si aucun patch non artificialisé n'est disponible, la forêt colonise aléatoirement des patches artificialisés (*zone-type* = "*artificialise*"), illustrant une colonisation opportuniste.

Ainsi, la régénération et l'extension reproduisent à la fois la restauration de la forêt sur les zones dégradées et sa propagation vers de nouvelles surfaces disponibles, en tenant compte de la configuration spatiale et de la structure des massifs forestiers.

Extension de la surface artificialisée

Ce comportement simule l'urbanisation croissante, où les zones artificialisées regroupent urbain et agricole. La croissance de ces zones peut repousser ou empiéter sur des surfaces forestières, reflétant la pression anthropique sur l'espace.

Au début de la simulation, un slider définit le pourcentage d'extension annuelle (*artificialization-extension-origin*). Le nombre de patches à artificialiser est ajusté par un coefficient lié à la surface de forêt restante (*coef-foret-artif*), de sorte que moins de forêt disponible limite l'expansion (*variance-artif*).

L'artificialisation suit un ordre de priorité : d'abord les zones non artificialisées, puis les forêts abîmées, et enfin les forêts intactes, simulant le coût et la facilité de conversion des terrains. La sélection se fait par proximité, c'est-à-dire parmi les patches voisins de zones déjà artificialisées. Le processus continue jusqu'à ce qu'il atteigne le quota, en tenant compte de la disponibilité spatiale et du coefficient.

Ainsi, le modèle reproduit l'expansion progressive et priorisée de l'urbanisation et de l'agriculture sur le paysage, intégrant les contraintes de surface forestière et la logique spatiale de propagation.

Limites :

Une des principales limites de ce modèle est qu'il ne différencie pas le comportement entre zone urbaine et champ agricole. Or, ces deux milieux suivent des mécanismes d'expansion légèrement différents. L'expansion urbaine suit des axes de transport ou de topographie, tandis que l'agriculture s'étend sur des surfaces disponibles et ayant une plutôt bonne qualité de sol. Bien que les zones urbaines présentent des sols imperméables et une biodiversité plus pauvre, les champs possèdent des sols moins imperméables et une biodiversité un peu plus riche (dans la limite des pratiques agricoles). Ces deux espaces présentent donc des intérêts environnementaux différents.

Le modèle ne tient pas compte des types d'espèces d'arbres ni de leur diversité. Une forêt diversifiée sera davantage résiliente à une perturbation. De plus, une forêt exploitée est généralement moins diversifiée et donc moins résiliente. Or, chaque paramètre de ce modèle est indépendant et ne s'influence pas.

Les réseaux routiers sont absents du modèle. Ces réseaux peuvent guider des dynamiques spatiales d'exploitation forestière (en raison de l'accessibilité d'une zone), mais aussi influencer l'expansion de l'artificialisation. De plus, la topographie est un autre facteur écarté du modèle, elle peut influencer les logiques d'expansion de l'artificialisation ou les zones forestières mises en exploitation.

Le modèle se fonde sur une zone géographique existante, mise en donnée d'entrée via les deux PNG. Une répartition spatiale différente des patches pourrait induire des résultats différents. Les patches de forêt, une fois régénérés, perdent leur mémoire. Ainsi, la forêt est remise à zéro. Or, en réalité, les perturbations marquent durement les écosystèmes et peuvent induire une fatigue écologique, ou à l'inverse montrer une capacité d'adaptation du milieu. La colonisation forestière s'effectue aléatoirement dans la zone artificialisée pour plus de simplification. Cependant, le modèle surestime cette colonisation, qui, en réalité, s'effectue sur des surfaces limitées (friches agricoles/urbaines) et dépend des politiques de gestion.

Scénarios :

Trois scénarios ont été réalisés pour ce modèle :

Le premier montrait une tendance actuelle avec une artificialisation maîtrisée avec une part plus importante des incendies, des maladies et des exploitations et avec une régénération forestière réduite.

Le deuxième se focalise sur une forte décroissance d'artificialisation et l'augmentation du volume forestier sur les zones artificialisées

Le dernier se focalise sur une augmentation du changement climatique avec une forte augmentation des incendies, une forte augmentation des maladies, une augmentation des exploitations et une forte diminution de la régénération forestière

Notes sur l'implémentation

Le langage de programmation utilisé pour ce modèle est NetLogo. La version de NetLogo est la 7.0.0. En ce qui concerne les temps de calcul, ils peuvent prendre un peu de temps (quelques secondes) en fonction de la configuration de votre ordinateur. La résolution utilisée est modulable en fonction de la taille des rasters PNG importés mais aussi de la volonté des utilisateurs.

Le modèle repose uniquement sur des agents de type patch. L'environnement est créé grâce à l'importation d'images raster PNG via ("setup-environment"). Chaque tick correspond à 1 an et la procédure ("go") exécute successivement tous les processus : artificialisation, exploitation, maladie, incendie et régénération.

Références

Aguejdad, R. (2011). Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne : Rennes Métropole.

Arthur Guerin-turcq. (2023). Les forêts dans le monde, des milieux anthropisés : Un état des lieux. Géoconfluences. <https://hal.science/hal-04214240>

Bouisset, C. (2021). Incendies de forêt à l'heure de l'anthropocène : Questions d'échelles. In J. Rebotier, Les risques et l'anthropocène (p. 59-79). ISTE Group.
<https://doi.org/10.51926/ISTE.9041.ch2>

Hasan, A. F. (2019). Évaluation de la dégradation des forêts primaires par télédétection dans un espace de front pionnier consolidé d'Amazonie orientale (Paragominas). Le Mans université.

Gaëtan Levillain. (2023). Quand l'industrie fait feu de tout bois : Persistance du bois en Europe et redéfinition des frontières extractives (1913-2020). Histoire & mesure, XXXVIII(1), Article 1. <https://doi.org/10.4000/historemesure.19188>

ONU (2024) Les forêts de plus en plus soumises à des pressions liées au climat, selon un rapport de la FAO <https://news.un.org/fr/story/2024/07/1147251>

Locke, R., Mehaffy, M., Haas, T., & Olsson, K. (2018). Urban Heritage as a Generator of Landscapes : Building New Geographies from Post-Urban Decline in Detroit. Urban Science, 2(3), 92. <https://doi.org/10.3390/urbansci2030092>

Maienza, A., Ungaro, F., Baronti, S., Colzi, I., Giagnoni, L., Gonnelli, C., Renella, G., Ugolini, F., & Calzolari, C. (2021). Biological Restoration of Urban Soils after De-Sealing Interventions. Agriculture, 11(3), 190. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030190>

Proisy, C. (2014). Résultats et perspectives pour les mangroves [Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches]. Université de Montpellier II.

Résultats 2022 de l'Inventaire forestier national : Une forêt française confrontée aux dérèglements climatiques - Portail IGN - IGN. (2022, octobre 20).
<https://www.ign.fr/espace-presse/resultats-2022-de-linventaire-forestier-national-une-foret-francaise-confrontee-aux-dereglements>

Vennetier, M. (2012). Changement climatique et dépérissements forestiers : Causes et conséquences. In Changement climatique et modification forestière (p. 50-60). CNRS.
<https://hal.science/hal-00756083>

Annexe :

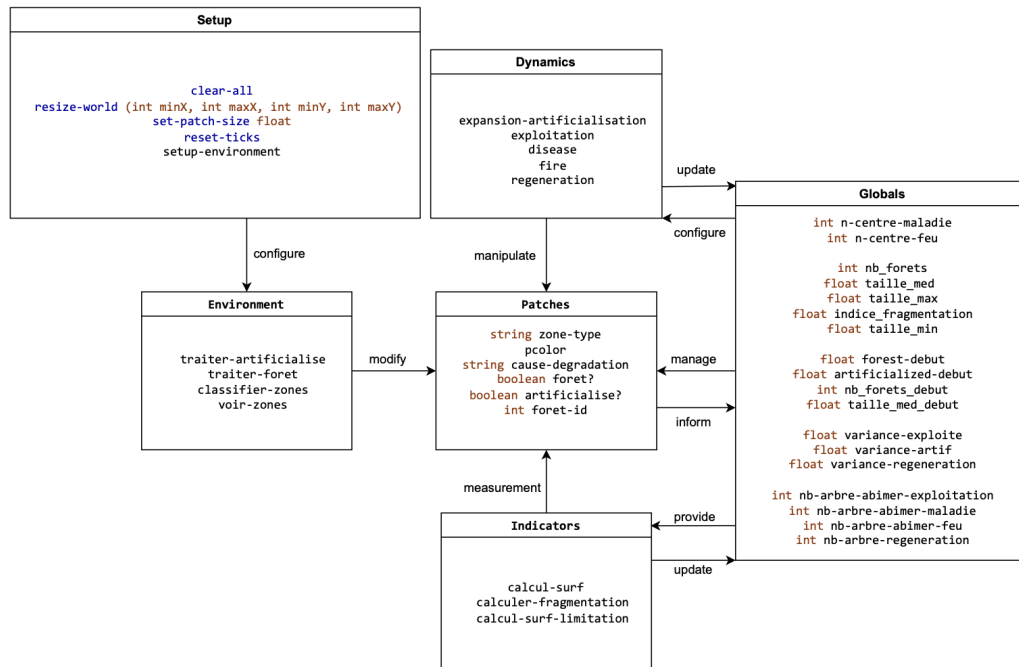


Figure 1 : *Diagramme UML du modèle “dégradation forestière”*

source : Liegeon Théo, Bayel Lisa, Fatouaki Boutayna, Zarenezhad Niloofar, Schlick Vincent (2025)