



# MODADAPT

## Quels modèles pour aider les décisions d'adaptation des forêts au changement climatique ?

### Rapport final

Coordinateur : Myriam LEGAY

Durée du projet : 2021-2023



## 1. Volet technique

### 1.1. Enjeux et objectifs du projet

Les impacts attendus du changement climatique sur la forêt interpellent la gestion forestière. Le secteur forêt-bois est d'ores et déjà perturbé par des crises liées à des accidents climatiques qui devraient s'intensifier dans un proche futur. L'adaptation des forêts est devenue un enjeu majeur, inscrit dans les politiques publiques (Feuille de route pour l'adaptation des forêts au changement climatique, plan de relance...). Dans ce contexte de transition et d'incertitude, les gestionnaires forestiers expriment le besoin d'outils pour assister les décisions sylvicoles, et notamment le choix des essences.

Les objectifs du projet sont :

- Définition d'un cadre analytique pour une évaluation comparative des prédictions des modèles ;
- Cartographie et description de la diversité des modèles forestiers sensibles au climat ;
- Cartographie et description de la diversité des décisions forestières à différentes échelles ;
- Recommandations pour le développement de l'offre d'aide à la décision basée sur les modèles forestiers sensibles au climat.

### 1.2. Comité de suivi

Le comité de pilotage du projet est composé de :

- Myriam Legay, AgroParisTech, coordonnatrice
- Nicolas Picard, Ecofor, co-coordonnateur
- Vincent Badeau, INRAE, UMR Silva
- Christian Piedallu, AgroParisTech, UMR Silva
- Julien Sainte-Marie, AgroParisTech, UMR Silva
- Céline Perrier, CNPF/Aforce
- Hedi Kebli, CNPF/Aforce
- Alexandre Piboule, ONF

Nikola Besic, recruté dans un premier temps pour le projet comme chargé de recherche, a intégré le comité suite à son recrutement par l'IGN.



Ce comité s'est réuni à plusieurs reprises :

- Le 4 mai 2021, pour un jury de recrutement des candidats au poste de chargé de recherche.
- Le 8 juin 2021, pour une première réunion de projet.
- Le 29 septembre 2021, pour une seconde réunion de projet.
- Le 10 décembre 2021, pour une troisième réunion de projet.
- Le 15 décembre 2021, pour un deuxième jury de recrutement des candidats au poste de chargé de recherche (remplacement du premier chargé de recherche recruté).
- Le 21 avril 2022, pour une quatrième réunion de projet.
- Le 24 mai 2022, pour une cinquième réunion de projet.
- Le 29 septembre 2022, pour une sixième réunion de projet.

### 1.3. Etape du travail – déroulement du projet

Le projet s'est déroulé principalement en trois étapes. La première étape a consisté en l'élaboration d'un cadre méthodologique pour la comparaison de modèles. La deuxième étape a concerné la cartographie des modèles forestiers sensibles au climat, développés en France, et enfin, la cartographie des différentes décisions forestières sensibles au climat à différentes échelles de décision.

### 1.4. Méthode

- **Modélisation de l'impact du changement climatique sur la forêt : un nouveau cadre d'analyse et une nouvelle métrique pour l'analyse comparative de modèles**

L'évaluation de modèle proposée s'appuie sur un nouveau cadre d'analyse comparative qui consiste à projeter à la fois les prédictions du modèle et les observations indépendantes dans l'espace des variables du modèle. En effet, les différents modèles qui prédisent la dépendance climatique des espèces d'arbres opèrent dans des espaces différents, c'est-à-dire qu'ils ont des variables de "sortie" et des covariables (y compris des variables climatiques) différentes. Cela rend leur inter-comparaison directe difficile, voire impossible. Nous avons donc envisagé une approche où la sortie de chaque modèle était réduite à la variable binaire reflétant la présence/absence de l'espèce (Cheaib et al., 2012) - une information qui peut être dérivée d'un inventaire forestier national ou d'une étude floristique. Pour chaque modèle, la présence prédite des espèces a ensuite été projetée dans l'espace des variables du modèle. De même, la présence observée des espèces provenant d'un inventaire forestier national a été projetée dans le même espace des variables du modèle. Les deux nuages de points de présence ont finalement été comparés à l'aide d'une métrique de similarité. Cette métrique a été

développée en utilisant l'analyse en composantes principales (ACP) (Jolliffe, 2002) et l'analyse de co-inertie (ACI) (Dolédec and Chessel, 1994) à différentes échelles spatiales. Cette métrique a permis de quantifier le décalage entre le nuage de points issus des prédictions du modèle et celui issu des observations et, surtout, permet de comprendre ce décalage en termes de variables du modèle, notamment climatiques.

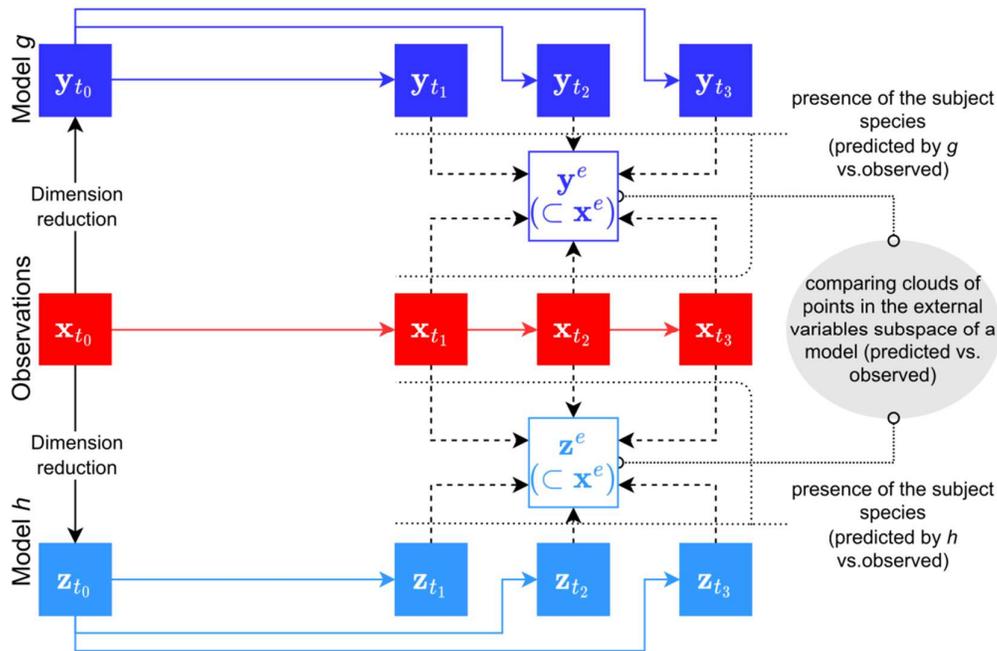


Figure 1. Schéma de principe de l'approche de comparaison proposée

Le cadre de comparaison de modèles qui réduit l'évaluation du modèle à la comparaison de nuages de points, est complété par un indice de similarité entre nuages de points, capable de résumer les différentes dimensions de l'espace des phases en une métrique unidimensionnelle. L'ACP est une technique statistique couramment utilisée qui représente une transformation linéaire orthogonale qui transforme l'espace original des données analysées en un nouvel espace construit autour de la direction de la variance maximale. L'ACI est une méthode statistique multivariée qui, basée sur l'inertie comme mesure de la variabilité des données, peut être utilisée pour mesurer la concordance entre deux ensembles de données. L'ACP permet la réduction de dimension et l'ACI permet d'estimer la similarité entre les nuages de points (Figure 1).

Le cadre d'analyse a été illustré avec le modèle de distribution des espèces d'arbres IKS (RMT-Aforce, 2022) appliqué au hêtre (*Fagus sylvatica*) en France. La variable de sortie d'IKS est la présence/absence de l'espèce. La sortie d'IKS est prédite à partir seulement de trois variables :



le déficit hydrique annuel, la somme annuelle des degrés-jours et la température minimale annuelle.

La comparaison de la capacité de deux modèles à représenter l'impact du climat sur la forêt, qui a motivé le développement du nouveau cadre d'évaluation des modèles et de la nouvelle métrique de similarité des nuages de points, a été illustrée avec deux modèles de distribution des espèces pour le sapin (*Abies alba*) en France. L'un de ces modèles est l'IKS. L'autre est le modèle DIGI-SDM de Piedallu et al. (2016).

- **Cartographie des modèles forestiers sensibles au climat**

La cartographie des modèles a été effectuée à travers une revue des modèles d'évolution forestière sensibles au climat, développés en France, afin de mettre en évidence leur potentiel pour l'aide à la décision, dans l'objectif de promouvoir la diversification de l'offre d'aide à la décision basée sur les modèles. Les modèles qui entrent dans le champ de cette revue comprennent tous les modèles sensibles au climat qui permettent de simuler l'évolution des forêts, dont les modèles de distribution, les modèles de croissance et de productivité, les modèles de dynamique forestière, et tous les modèles de risques biotiques et abiotiques, qui représentent au moins l'évolution d'un attribut du couvert forestier. Afin de décrire la diversité des modèles forestiers sensibles au climat, nous avons considéré successivement différentes caractéristiques : l'approche de modélisation, la façon dont le modèle représente le couvert forestier, les processus représentés, les variables d'entrée, les variables de sortie, ainsi que les types de forêt qu'il peut représenter, ainsi que le grain spatial de cette représentation. Des entretiens ont été effectués avec les modélisateurs pour la validation de la description des modèles. Un jeu de données regroupant les caractéristiques ainsi décrites de l'ensemble des modèles a été élaboré et des fiches de description ont été élaborées pour chacun des modèles.

- **Cartographie des décisions forestières sensibles au climat à différentes échelles de décision**

Dans le contexte du changement climatique, le souci de l'adaptation devient omniprésent, au point qu'il convient maintenant de considérer toutes les décisions forestières en relation avec le climat, qu'il s'agisse de décision de gestion, de planification ou de politique forestière.

Pour projeter l'évolution du climat, la réponse de la forêt et l'impact sur ces décisions, nous allons avoir un besoin croissant de modèles. La cartographie des décisions forestières à différentes échelles permettra de mieux mettre en relation les différents types de modèles, avec les décisions qu'ils sont susceptibles d'éclairer. Elle permettra par ailleurs, de donner à voir aux modélisateurs la variété des décisions et des échelles que leurs simulations peuvent éclairer. Elle permettra collectivement de mieux prendre conscience de l'impact potentiel du



changement climat sur les décisions forestières, et d'en faire un état partageable et communicable.

Pour cartographier les décisions forestières à différentes échelles de décision, un atelier a été organisé, ayant pour objectif la cartographie des décisions forestières sensibles au climat en concertation avec les parties prenantes, afin de mieux les articuler avec les modèles susceptibles d'éclairer la décision

L'atelier a essayé de répondre principalement à deux questions :

- Quelles sont les décisions forestières sensibles au climat à l'échelle régionale ou plus, d'un bassin de production, d'un massif forestier et d'une parcelle ?
- Quel est l'état actuel de connaissance des modèles forestiers sensibles au climat, susceptibles d'éclairer les décisions forestières sensibles au climat ? Quelles sont les attentes ?

L'atelier a été organisé en mode « World café » avec 4 tables en fonction des échelles de décision. Il a été organisé en distanciel avec la participation de 28 participants hors organisateurs (ONF, CNPF, Coopératives forestières, SERFOB, DSF, MASA, INRAE GeeDAAF...).

### 1.5. Résultats

- **Comparaison multi-échelle des métriques avec le modèle IKS**

Le modèle de distribution des espèces IKS pour le hêtre a été analysé à l'échelle de la France, mais en compilant les observations des inventaires forestiers des différents pays européens (Mauri et al., 2017) ou en répartissant les observations de l'inventaire forestier français entre les régions écologiques, il peut également être analysé aux niveaux continental et régional. Les deux coefficients, la co-inertie normalisée basée sur les présences prédites (RVg) et la co-inertie normalisée basée sur les présences observées (RVo) ont un score élevé à l'échelle continentale (Fig. 2a et 2b).

Le modèle IKS ayant été calibré à l'aide de données européennes, le score élevé à l'échelle européenne est attendu et reflète l'amplitude des gradients des variables climatiques et l'amplitude correspondante de la réponse du hêtre à l'échelle européenne. Des scores élevés ont également été obtenus à l'échelle de la France en raison de la bonne représentativité environnementale de la France pour le hêtre. Cependant, lorsqu'on passe à l'échelle régionale, les scores RVg et RVo varient selon les régions écologiques, ce qui montre que le modèle calibré à l'échelle continentale peut ne pas expliquer correctement la dynamique de l'espace de phase au niveau local. Les scores RV à l'échelle régionale ne sont pas significativement corrélés avec le nombre d'observations par région (Fig. 2e et 2f). Le kappa de Cohen et la statistique de compétence réelle (TSS) donnent des résultats très différents (Fig. 2c et 2d). Le score kappa de Cohen est faible à toutes les échelles, y compris l'échelle européenne malgré

la calibration du modèle à cette échelle, ce qui indique sa faible utilité dans le cadre proposé. Le TSS montre un comportement intéressant qui est en quelque sorte opposé à celui observé avec la nouvelle métrique en termes de dépendance d'échelle. En effet, le score est plutôt bon à l'échelle européenne, légèrement moins bon à l'échelle française, et très bon à l'échelle régionale, variant dans une certaine mesure entre les régions. Cela peut s'expliquer en partie par la dépendance du score TSS au rapport entre les présences et les absences dans les observations (prévalence), qui peut devenir important avec la diminution de la taille de l'échantillon.

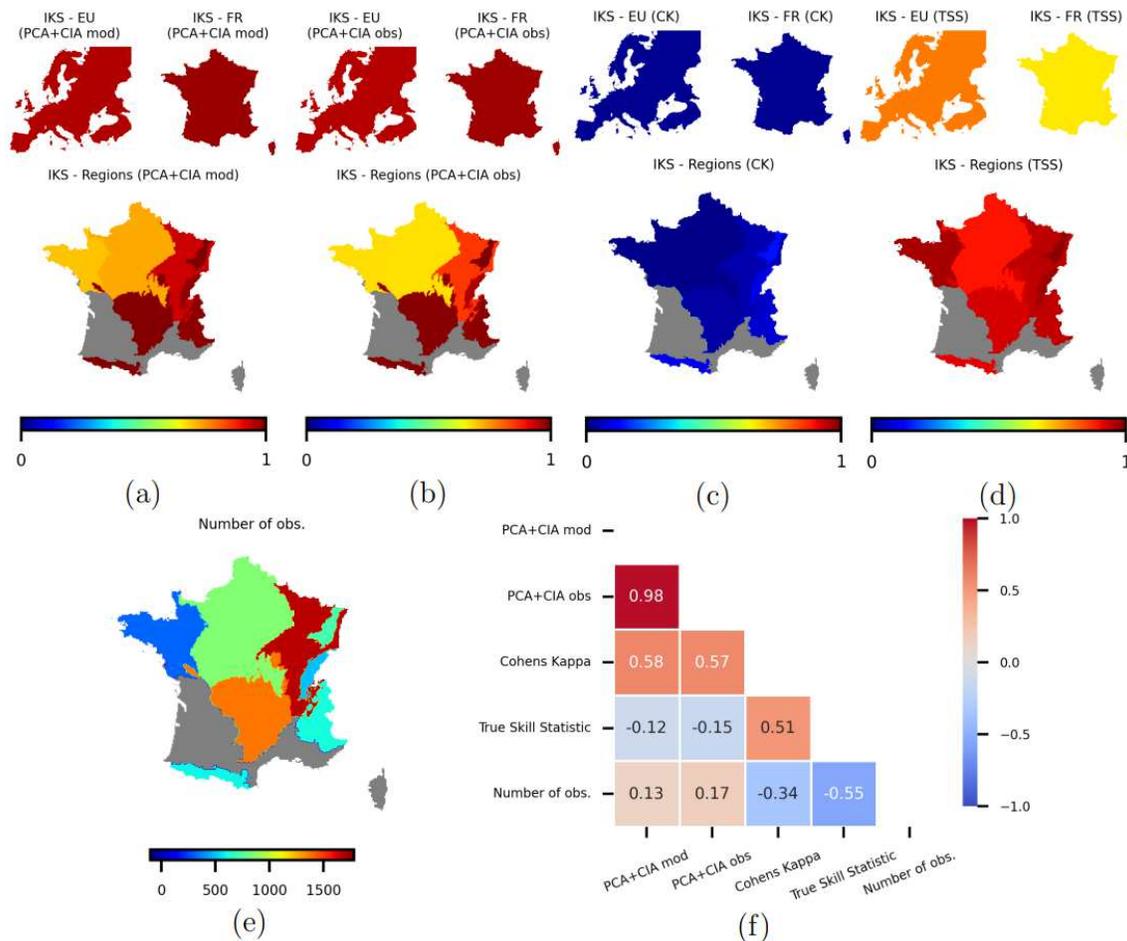


Figure 2. Évaluation du modèle IKS pour le hêtre à trois échelles (Europe, France, régions écologiques françaises) : (a) co-inertie normalisée basée sur les présences prédites (RVg), (b) co-inertie normalisée basée sur les présences observées (RVo), (c) métrique kappa de Cohen (CK), (d) métrique True Skill Statistic (TSS), (e) taille de l'échantillon par région, (f) matrice de corrélation de Pearson entre les différentes métriques à l'échelle régionale et la taille de l'échantillon, où la corrélation est calculée entre les régions.

- **Comparaison inter-modèles**

L'illustration de l'approche avec deux modèles de distribution des espèces a été effectuée pour le sapin blanc (*Abies alba*) en France. L'un de ces modèles est IKS. L'autre est le modèle DIGI-SDM de Piedallu et al. (2016). Comme IKS, DIGI-SDM dépend exclusivement de variables externes : la température annuelle moyenne 1961-1990, le déficit hydrique estival du sol 1961- 1990 et l'apport en azote semblent pertinents dans le cas du sapin blanc. Sa sortie est la probabilité de présence de l'espèce qui est ensuite convertie en présence/absence en la comparant à une valeur seuil de probabilité.

En suivant les mêmes étapes que précédemment, nous projetons d'abord les présences prédites pour chaque modèle dans leur espace respectif de variables externes. Ensuite, nous projetons les présences observées issues des données de l'inventaire forestier national dans ces deux espaces différents, ce qui nous permet d'avoir un premier aperçu de la concordance entre les deux paires de nuages après application de l'ACP. Cependant, la véritable valeur ajoutée de l'approche proposée provient des coefficients RV aux différentes échelles géographiques (Fig. 3).

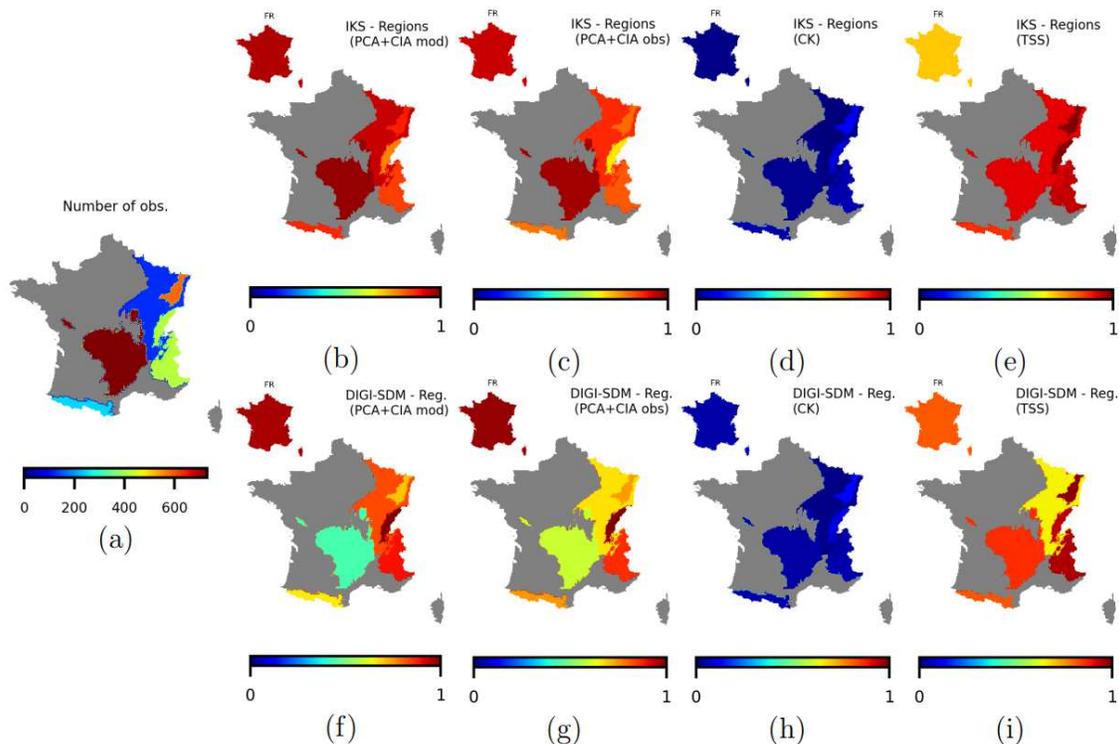


Figure 3 : Comparaison inter-modèle entre IKS (b-e) et DIGI-SDM (f-i) pour le sapin blanc (*Abies alba*) à deux échelles qui sont la France et ses régions écologiques : (a) taille de l'échantillon par région écologique, (b) et (f) métrique RVg, (c) et (g) métrique RVo, (d) et (h) kappa de Cohen, (e) et (i) TSS.



Contrairement à la métrique du kappa de Cohen, qui semble ne faire presque aucune différence entre les deux modèles malgré la différence non négligeable des variables externes sur lesquelles ils reposent, le TSS et les deux coefficients RV de la nouvelle métrique proposée dévoilent certaines différences. Le score TSS augmente presque uniformément à mesure que l'échelle augmente. Quant à la nouvelle métrique, malgré un score élevé à l'échelle nationale (échelle à laquelle modèle DIG-SDM a été calibré), les scores varient considérablement entre les régions, et pas de la même manière pour les deux modèles. Cela indique peut-être que l'approche de modélisation et le choix des variables externes peuvent être plus ou moins pertinents selon l'échelle, et selon les régions écologiques également. Pour en revenir à la motivation principale du projet, les décisions d'adaptation ne devraient pas être basées sur un seul modèle.

- **Cartographie des modèles forestiers sensibles au climat**

### ***Approche de modélisation***

Les différentes approches de la modélisation forestière peuvent être subdivisées en deux approches principales : l'approche phénoménologique et l'approche basée sur les processus. Les modèles phénoménologiques reposent sur une approche holistique reliant les causes d'un processus aux effets en fonction du fonctionnement passé du système (Gustafson, 2013). Ils mettent en évidence la relation entre la réponse du couvert forestier et les facteurs environnementaux, sans faire d'hypothèses sur ce qui sous-tend la relation. Par contre, les modèles basés sur les processus ou mécanistes reposent sur une logique réductionniste selon laquelle les processus ou mécanismes par lesquels les causes produisent des effets sont explicitement modélisés (Gustafson, 2013). Nous considérons les modèles phénoménologiques couplés à un modèle basé sur les processus dans le but de les rendre sensibles au climat sous l'appellation de « modèles couplés ». La classification des modèles décrits sur la base de l'approche de modélisation est présentée dans le Tableau 1. La liste des modèles représentant le couvert global présentée n'est pas exhaustive. En effet, la famille des modèles de distribution des espèces est représentée seulement par trois modèles. Cependant, les autres familles de modèles sont représentées de façon assez complète. Il existe plusieurs modèles de croissance développés en France qui ne sont pas sensibles au climat, donc n'entrant pas le champ des modèles décrits dans cette revue, mais qui peuvent être rendus sensibles au climat par couplage à un modèle basé sur les processus, comme c'est le cas pour le modèle MARGOT-CC-MD. La tendance actuelle de couplage de modèles non sensibles au climat aux modèles basés sur les processus permettra d'étendre la liste de modèles sensibles au climat présentés dans le Tableau 1.

## Représentation du couvert forestier

Selon la manière dont le modèle représente le couvert forestier au niveau organisationnel, la prise en compte ou non de la distance entre les arbres et l'homogénéité de l'objet représenté (Porté & Bartelink, 2002 ; Pretzsch et al., 2015), les MEFSC peuvent être classés en cinq groupes : (1) modèles représentant le couvert forestier global, (2) modèles représentant le peuplement par un arbre moyen, (3) modèles représentant le peuplement par une distribution d'arbres, (4) modèles d'arbres indépendants de la distance, et (5) modèles d'arbres dépendants de la distance. La classification des différents modèles décrits est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1. Liste des MEFSC décrits selon la manière dont le modèle représente couvert forestier

Classes	Modèles	Modèles phénoménologiques	Modèles basés sur les processus, hybrides ou couplés	Références
Modèles de couvert forestier global	DIGI-SDM	x		Piedallu et al. 2016
	N-NBM	x		Badeau et al. 2010
	IKS	x		Le Bouler 2014
	ΔTraitSDMs	x		Leites & Garzón 2023
	BioClimSol	x		Lemaire 2017
	DIGI_dieback	x		Taccoen et al. 2019
Modèles de peuplement représentant l'arbre moyen	PHENOFITS		x	Chuine and Beaubien 2001
	BILJOU		x	Granier et al. 1999
	SurEau		x	Cochard et al. 2021
	CASTANEA		x	Dufrêne et al. 2005
	SPAC		x	Tuzet et al. 2003
	SIERRA		x	Mouillot et al. 2001
Modèles de peuplement basés sur une distribution d'arbres	SALEM	x		Vallet and Perot 2018
	MARGOT-CC-MD		x	Audinot, 2021
	GO+		x	Moreaux et al. 2020
	MuSICA		x	Ogée et al. 2003
	ORCHIDEE-CAN		x	Krinner et al. 2005
Modèles d'arbres indépendants des distances	ForCEEPS		x	Morin et al. 2020
Modèles d'arbres dépendant des distances	NOTG		x	Simioni et al. 2016
	PDG		x	Oddou-Muratorio and Davi 2014
	RReShar		x	Helluy et al., 2020

Les modèles de distribution des espèces représentent le couvert forestier global par la probabilité de présence de l'espèce. Ils permettent de représenter cet attribut du couvert indépendamment d'autres caractéristiques du peuplement. Les modèles de peuplement représentant l'arbre moyen décrivent la réponse du peuplement par des attributs moyens.



Certains modèles représentent le peuplement par une distribution d'arbres en classes de taille. Les modèles d'arbres indépendants de la distance décrivent l'évolution temporelle de chaque individu du peuplement sans référence à sa localisation spatiale. Par contre, les modèles d'arbres dépendants de la distance décrivent l'évolution temporelle de chaque individu en prenant en compte leur emplacement spatial, ce qui permet de prendre en compte l'environnement local des arbres au moyen d'indices de compétition (Porté & Bartelink, 2002).

Le développement de modèles sensibles au climat est un domaine de recherche dynamique. Il faut noter que pratiquement tous les modèles sensibles au climat sont postérieurs à 2000 (Tableau 1), alors que le développement des modèles de d'évolution forestière en France est bien antérieur. Dans leur synthèse de 2002, Porté & Bartelink interrogent la capacité des « nouveaux » modèles d'alors à modéliser les peuplements hétérogènes ; ils font souvent référence au climat, mais la prédiction de la réponse des forêts au climat vient derrière la question de l'hétérogénéité des peuplements. Pour les modèles sensibles au climat, il semble qu'on soit encore actuellement dans une phase d'exploration radiative des possibilités offertes par la modélisation. Les typologies existantes de modèles (telles que décrites dans la synthèse de Porté & Bartelink, 2002) restent valables pour décrire les différences entre modèles sensibles au climat (Tableau 1). Cependant, il devient de plus en plus important de se pencher sur les processus mis en œuvre dans les modèles (Tableau 2), qui fera l'objet de la section suivante.

### ***Attributs ou processus représentés***

Les modèles basés sur les processus permettent de représenter plusieurs processus liés aux cycles du carbone, de l'azote et de l'eau. Ils représentent aussi des processus tels que la phénologie, la régénération/valeur sélective, la mortalité et la sénescence. Les processus liés au cycle de l'eau sont les plus représentés dans les modèles basés sur les processus (100%), suivi de ceux liés au cycle de carbone (75%), à l'hydraulique (45%), alors les processus liés au cycle d'azote ne représentent que 30% (Tableau 2).

La façon dont les processus sont pris en compte et le nombre de processus représentés varient d'un modèle à l'autre. Considérons par exemple la représentation de la capacité de régénération. Le modèle PHENOFIT, modélise la valeur sélective d'une espèce, en considérant les dommages causés par le gel, la survie et le succès reproducteur, avec la probabilité de survie diminuant lorsqu'une sécheresse sévère se produit entre la formation des feuilles et leur coloration, et le succès reproducteur diminuant lorsque le gel se produit pendant la floraison. Dans le modèle SIERRA, la régénération est simulée sur la base de la germination et de la pousse des semis en fonction de la température et du potentiel hydrique de la surface du sol. Dans le modèle ForCEEPS, le recrutement est simulé de façon globale en fonction de la

disponibilité de la lumière, de l'indice de sécheresse, de la température printanière, de la somme des degrés-jours saisonniers et de la pression d'abrouissement. Dans le modèle RReShar, les plantules sont divisées en classes de taille, leur croissance dépend de la disponibilité en eau et en lumière, et une hauteur de transition marque le recrutement des jeunes plantules. RReShar prend en compte le stade juvénile, contrairement aux modèles ForCEEPS et SIERRA, alors que ForCEEPS prend en compte plus de facteurs dans la simulation du processus de la régénération. Ainsi, ces modèles simulent la régénération de différentes manières et avec différents niveaux de détail.

Tableau 2. Processus représentés par les modèles basés sur les processus

Modèles	Cycle du carbone					Cycle de l'azote	Cycle de l'eau				Processus hydrauliques			Autres processus			
	Photosynthèse	Respiration	Allocation du carbone	Croissance	Bilan carbone du sol	Bilan azote	Evapotranspiration	Interception des pluies	Ruissellement/infiltration	Drainage	Cavitation	Conductance stomatique	Potentiel hydrique de la	Potentiel hydrique du sol	Phénologie	Mortalité	Régénération/fitness
PHENOFIT5	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X			X
BILJOU							X	X	X	X			X				
SurEau	X	X					X	X	X		X	X	X	X			X
CASTANEA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X		
SPAC	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X				
SIERRA	X	X	X	X			X	X	X	X		X	X				X
MARGOT-CC-MD	X	X	X	X	X	X	X	X	X						X	X	
GO+	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
MuSICA	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		
ORCHIDEE-CAN	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X			X	X	X
ForCEEPS				X			X	X	X						X	X	X
NOTG	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X			X		
PDG	X	X	X	X	X	X	X	X	X						X	X	X
RReShar				X			X	X		X						X	X

L'un des processus le plus difficilement représenté par les modèles basés sur les processus est la mortalité. Globalement, deux mécanismes peuvent être pris en compte : la mortalité par manque de carbone (ou par compétition), et la mortalité par défaillance hydraulique (Tableau 3).

Tableau 3. Représentation de la mortalité dans les modèles basés sur les processus.



Modèles	Représentation de la mortalité
PHENOFITS	Mortalité due au manque de carbone
BILJOU	-
SurEau	Mortalité due à une défaillance hydraulique
CASTANEA	Mortalité due au manque de carbone
SPAC	-
SIERRA	Mortalité due au manque de carbone
SALEM	Mortalité due à la compétition
GO+	-
MuSICA	Mortalité due au manque de carbone
ORCHIDEE-CAN	Mortalité due au manque de carbone
ForCEEPS	Mortalité due à la compétition
NOTG	Mortalité due au manque de carbone
PDG	Mortalité due au manque de carbone
RReShar	Mortalité due à la compétition

La connaissance des différents processus représentés dans les modèles, la manière dont ils sont représentés et des niveaux de détails correspondants, permettra aux utilisateurs de choisir et d'utiliser efficacement les modèles.

### ***Principales variables d'entrée des modèles***

La disponibilité des données d'entrées d'un modèle est d'une grande importance dans le choix de son utilisation, d'où l'importance pour les utilisateurs des modèles de connaître les données requises pour utilisation de chacun des modèles disponibles.

La modélisation de l'évolution forestière nécessite des données d'entrée parfois difficiles d'accès, et plus la modélisation est détaillée, plus les besoins en données d'entrée sont importants. Les exigences en matière de données d'entrée varient en fonction de l'approche de modélisation utilisée. Les MEFS varient dans leur complexité et donc dans leur applicabilité aux questions de gestion forestière. L'obtention des données d'entrée des modèles constitue l'un des freins à leur utilisation. Le tableau 4 présente les principales données d'entrée des différents modèles. Parmi les données climatiques, les températures et les précipitations constituent les principales données d'entrée requises pour tous les modèles. Le rayonnement solaire, l'humidité relative et de la vitesse du vent sont requis respectivement pour 75, 65 et 6% des modèles décrits. Les variables d'entrée telles que le déficit de pression de vapeur, la pression atmosphérique et la concentration en CO<sub>2</sub> sont les moins mobilisées.

La principale donnée pédologique requise comme variable d'entrée des modèles est le contenu en eau du sol. Pour ce qui concerne les variables liées à l'arbre et au peuplement, les principales données requises dans les modèles concernent le nombre de tiges ou d'arbres et leur diamètre.

Tableau 4. Principales données d'entrée des modèles

Modèles	Climat							Sol				Arbre & peuplement				
	Rayonnement solaire	Température	Précipitations	Vitesse du vent	Déficit de pression de vapeur	Humidité relative	Pression atmosphérique	Concentration en CO <sub>2</sub>	Contenu en eau du sol	Texture du sol	Profondeur du sol	Densité apparente	Nombre d'arbres par ha	Diamètre à x,3 m	Hauteur	Indice de surface foliaire
DIGI-SDM	X	X	X					X								
N-NBM	X	X	X		X	X		X								
IKS		X	X					X								
ΔTraitSDMs		X	X										X	X		X
BioClimSol		X	X					X				X	X	X		
MMTP		X	X					X				X	X	X		
SALEM		X	X					X				X	X			
PHENOFIT5	X	X	X	X		X		X								
BILJOU	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	
SurEau	X	X	X	X		X		X		X	X		X	X	X	
CASTANEA	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X
SPAC	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
SIERRA	X	X	X	X		X		X	X							
MARGOT-CC-MD	X	X	X	X		X		X	X			X	X			
GO+	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
MuSICA	X	X	X	X		X		X	X	X	X				X	X
ORCHIDEE-CAN	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X		X	X
ForCEEPS		X	X					X				X	X	X		
NOTG	X	X	X	X		X	X	X	X				X			
PDG	X	X	X	X		X		X	X	X		X	X	X	X	X
RReShar	X	X	X					X	X	X	X	X	X	X	X	

**Principales variables de sortie**



La pertinence des sorties d'un modèle joue un rôle important dans le choix de son utilisation. Il s'avère donc nécessaire d'outiller les utilisateurs des modèles en les informant sur les outputs de l'ensemble des modèles disponibles. Les modèles représentant le couvert forestier global simulent une caractéristique du peuplement en un point donné en fonction des variables environnementales, généralement la probabilité de présence d'une espèce, de dépérissement ou de mortalité. Les modèles basés sur les processus représentant le peuplement permettent généralement de simuler les processus liés au cycle du carbone (ex : productivité primaire nette) et de l'eau (ex : contenu en eau du sol, indice de sécheresse), ainsi que des caractéristiques globales du peuplement (par exemple l'indice de surface foliaire, ou le diamètre moyen). Par contre les modèles basés sur les processus qui représentent l'arbre permettent de simuler les caractéristiques des arbres et du peuplement telles que les diamètres, la hauteur, la surface terrière, le volume, etc. Certaines de ces caractéristiques du peuplement sont aussi simulés par les modèles phénoménologiques de croissance tels que SALEM et MARGOT-CC-MD.

### ***Type de forêt***

L'utilisation d'un modèle doit tenir compte du type de forêt auquel il peut être appliqué : peuplement régulier ou irrégulier, monospécifique ou multispécifique. Plusieurs modèles ont été développés pour les peuplements réguliers monospécifiques afin d'estimer la production de bois (Shifley et al., 2017 ; Pretzsch et al., 2015). Certains d'entre eux ont été appliqués aux forêts mixtes en considérant les espèces individuellement, en ignorant les interactions entre les arbres et en agrégeant les résultats en fonction de l'abondance de chaque espèce. Ces dernières années, la tendance est à l'élaboration de modèles applicables aux forêts irrégulières et plurispécifiques, avec des capacités de mélange d'espèces et de prise en compte des interactions interspécifiques (Pretzsch et al., 2015). Tous les modèles décrits dans cette revue sont applicables à des peuplements réguliers monospécifiques, 60% applicables à des peuplements irréguliers et seulement 35% à des peuplements mélangés.

### ***Echelle spatiale/objet spatial***



L'utilisation d'un modèle doit prendre en compte l'échelle spatiale et l'objet spatial représenté. Les modèles forestiers diffèrent par la plus petite unité spatiale à laquelle le modèle simule la dynamique forestière. L'objet spatial représenté peut être des arbres individuels, une cohorte ou une distribution d'arbres par classe de taille, un peuplement ou un paysage (Pretzsch et al., 2015). Alors que les modèles de peuplement ou de paysage ont une résolution plus grossière, en ce sens qu'ils considèrent les parcelles forestières comme des unités homogènes, en supposant par exemple l'uniformité de l'âge et de la composition des espèces, les modèles de cohorte simulent les arbres par classe de diamètre ou de hauteur, les types fonctionnels ou les couches écologiques, et les modèles forestiers basés sur les individus considèrent chaque arbre individuellement et les différentes interactions qui peuvent se produire entre eux. Par conséquent, l'objet spatial représenté permettra aux utilisateurs de s'assurer que la résolution des sorties fournira les détails nécessaires pour répondre aux questions ciblées, qu'il s'agisse de questions de politique forestière, de stratégie, planification ou de gestion. Pour ce qui concerne l'échelle spatiale d'application des modèles décrits dans cette revue, plus de 70% sont applicables aux échelles allant du peuplement à l'échelle nationale.

## 1.6. Conclusion et perspectives

La métrique développée fournit une mesure de la pertinence de la dynamique d'un modèle par rapport à celle des observations projetées dans l'espace des variables. La valeur ajoutée de l'approche est illustrée à l'aide d'un jeu de données simulées, mais aussi par l'évaluation multi-échelle d'un modèle de distribution des espèces ainsi que par la comparaison multi-échelle de modèles.

Il existe des lacunes à combler en termes de développement de modèles forestiers et de leur utilisation pour éclairer les décisions forestières. A titre d'exemple, les processus de régénération et de mortalité sont considérés de manière limitée dans les modèles basés sur les processus. Il y a un manque de modèles de feux de forêt et de modèles biotiques qui représentent la couverture forestière. La communication et la collaboration entre les modélisateurs forestiers et les décideurs doivent être soutenues par des moyens spécifiques pour faciliter le développement de modèles plus orientés vers les questions de gestion forestière et d'adaptation au changement climatique.

Pour chaque question de gestion forestière à chaque échelle, plusieurs modèles sont disponibles. Le nœud gordien à trancher est finalement de savoir comment choisir le modèle approprié, adapté à la question, aux données mobilisables et au niveau de technicité



mobilisable. Cependant, dans une perspective d'aide à la décision, le modèle doit rester un support pour clarifier les choix et objectiver la discussion, mais il ne doit pas se substituer au décideur, seul capable d'intégrer un ensemble de facteurs beaucoup plus large.

La perspective la plus évidente du cadre d'analyse développé serait l'exercice analytique de comparaison de plusieurs modèles forestiers sensibles au climat, qu'ils soient statistiques ou basés sur des processus. La perspective la plus ambitieuse serait de construire sur la base de l'approche analytique présentée une méthode de consensus qui combinerait les informations provenant de différents modèles à des échelles multiples. Le cadre d'analyse et la métrique associée pourraient également être adaptés et exploités par les modélisateurs pendant le processus de développement des modèles, par exemple pour vérifier la pertinence des variables prises en compte, ou pour comparer différents ensembles de variables environnementales (par exemple les variables climatiques issues de différents modèles climatiques).

Une autre perspective est de développer un cadre décisionnel qui fournira aux décideurs, à l'échelle de la France, un ensemble de critères de décision basés sur des connaissances d'experts et des modèles forestiers, qui fourniront une orientation pour le choix des espèces forestières comme objectif pour la gestion adaptative des forêts face au changement climatique. Ces décisions peuvent concerner les principales espèces forestières françaises en se basant sur les critères de performance dont la productivité forestière, dérivée de modèles basés sur les processus, le régime de risque forestier, dérivé de modèles d'évaluation des risques, et la probabilité de présence de l'espèce dérivée des modèles de distribution des espèces.

## 1.7. Synthèse

- Le nouveau cadre d'analyse développé inclut une nouvelle métrique pour l'analyse comparative des modèles forestiers intégrant l'impact des variables climatiques externes et traite le cas le plus général des espaces de phase disjoints entre les modèles, réduisant la comparaison à l'évaluation des présences prédites vs observées dans l'espace des variables externes de chacun des modèles.
- La quasi-totalité des modèles forestiers sensibles au climat, développés en France sont postérieurs à 2010, alors que le développement des modèles de dynamique forestière en France est beaucoup plus ancien, ce qui indique que nous sommes actuellement encore dans une phase d'exploration des possibilités offertes par la modélisation forestière sensible au climat.
- Le choix d'un modèle peut être déterminant dans la réalisation de prédictions pour appuyer les décisions forestières.



- Il existe une diversité de décisions forestières sensibles à différentes échelles liées à différents contextes décisionnels.
- Pour chaque question forestière à chaque échelle, plusieurs modèles sont disponibles. Pour les décideurs, l'enjeu est de connaître la diversité des modèles afin de choisir des modèles adaptés à la question posée et idéalement de comparer la diversité des simulations afin d'apprécier pleinement l'incertitude.



## 2. Volet financier

### 2.1. Tableau récapitulatif des dépenses et du nombre d'heures passées

### 2.2. Copie des pièces justificatives



## Références

- Audinot, T. (2021). Développement d'un modèle de dynamique forestière à grande échelle pour simuler les forêts françaises dans un contexte non-stationnaire (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- Badeau, V., Dupouey, J.L., Cluzeau, C., Drapier, J. & Le Bas, C. (2010). Climate Change and the Biogeography of French Tree Species: First Results and Perspectives? in Loustau D. (éd.), Forest, Carbon Cycle and Climate Change, Éditions Quae, Versailles, pp. 231-252.
- Chuine, I. & Beaubien, E.G. (2001). Phenology is a major determinant of tree species range. Ecology Letters, 4(5), 500-510.
- Cochard, H., Pimont, F., Ruffault, J. & Martin-StPaul, N. (2021). SurEau: a mechanistic model of plant water relations under extreme drought. Annals of Forest Science, 78(2), 1-23.
- Dolédec, S., & Chessel, D. (1994). Co-inertia analysis: an alternative method for studying species–environment relationships. Freshwater biology, 31(3), 277-294.
- Dufrêne, E., Davi, H., François, C., Le Maire, G., Le Dantec, V. & Granier, A. (2005). Modelling carbon and water cycles in a beech forest: Part I: Model description and uncertainty analysis on modelled NEE. Ecological Modelling, 185(2-4), 407-436.
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P. & Villette, S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. Ecological modelling, 116(2-3), 269-283.
- Gustafson, E.J. (2013). When relationships estimated in the past cannot be used to predict the future: using mechanistic models to predict landscape ecological dynamics in a changing world. Landscape ecology, 28(8), 1429-1437.
- Helluy, M., Prévosto, B., Cailleret, M., Fernandez, C. & Balandier, P. (2020). Competition and water stress indices as predictors of Pinus halepensis Mill. radial growth under drought. Forest Ecology and Management, 460, 117877.
- Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis for special types of data (pp. 338-372). Springer New York.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S. & Prentice, I. C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. Global Biogeochemical Cycles, 19(1).
- Le Bouler, H. (2014). Forêt et changements climatiques : Associer les concepts de niche écologique et de station forestière pour comprendre et préparer l'avenir, Innovations Agronomiques, p. 129-139.
- Leites, L., & Garzón, M. B. (2023). Forest trees adaptation to climate across biomes: Building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change. Global Change Biology.



- Lemaire, J. (2017). BioClimSol : un outil de vigilance climatique appliqué au douglas. *Forêt entreprise*, (234), 28-32.
- Mauri, A., Strona, G., & San-Miguel-Ayanz, J. (2017). EU-Forest, a high-resolution tree occurrence dataset for Europe. *Scientific data*, 4(1), 1-8.
- Moreaux, V., Martel, S., Bosc, A., Picart, D., Achat, D., Moisy, C., Aussenac, R., Chipeaux, C., Bonnefond, J.M., Figuères, S., Trichet, P., Vezy, R., Badeau, V., Longdoz, B., Granier, A., Rouspard, O., Nicolas, M., Pilegaard, K., Matteucci, G., Jolivet, C., Black, A.T., Picard, O. and Loustau, D. (2020). Energy, water and carbon exchanges in managed forest ecosystems: description, sensitivity analysis and evaluation of the INRAE GO+ model, version 3.0, *Geosci. Model Dev.*, 13, 5973–6009.
- Morin, X., Bugmann, H., de Coligny, F., Martin-StPaul, N., Cailleret, M., Limousin, J.M., Ourcival, J.M., Prevosto, B., Simioni, G., Toigo, M., Vennetier, M., Catteau, E. & Guillemot, J. (2021). Beyond forest succession: a gap model to study ecosystem functioning and tree community composition under climate change. *Functional Ecology*, 35(4), 955-975.
- Mouillot, F., Rambal, S., Lavorel, S. (2001). A generic process-based Simulator for mediterranean landscApes (SIERRA): design and validation exercises. *Forest ecology and management* 147: 75-97.
- Oddou-Muratorio, S. & Davi, H. (2014). Simulating local adaptation to climate of forest trees with a Physio-Demo-Genetics model. *Evolutionary applications*, 7(4), 453-467.
- Piedallu, C., Gégout, J.C., Lebourgeois, F., & Seynave, I. (2016). Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. *Journal of Vegetation Science*, 27(2), 387-399.
- Porté, A. & Bartelink, H.H. (2002). Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. *Ecological modelling*, 150(1-2), 141-188.
- Pretzsch, H., Forrester, D.I. & Rötzer, T. (2015). Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling*, 313, 276-292.
- Pretzsch, H. (2009). *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Springer. Berlin, Heidelberg, Germany.
- Shifley, S.R., He, H.S., Lischke, H., Wang, W.J., Jin, W., Gustafson, E.J., Thompson, J.R., Thompson III, F.R., Dijak, W.D. & Yang, J. (2017). The past and future of modeling forest dynamics: from growth and yield curves to forest landscape models. *Landscape ecology*, 32(7), 1307-1325.
- Simioni, G., Marie, G. & Huc, R. (2016). Influence of vegetation spatial structure on growth and water fluxes of a mixed forest: Results from the NOTG 3D model. *Ecological Modelling*, 328, 119-135.
- Taccoen, A., Piedallu, C., Seynave, I., Perez, V., Gégout-Petit, A., Nageleisen, L.M., Bontemps, J.D. & Gégout, J.C. (2019). Background mortality drivers of European tree species: climate change matters. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1900), 20190386.



Tuzet, A., Perrier, A., & Leuning, R. (2003). A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell & Environment*, 26(7), 1097-1116.

Vallet, P. & Perot, T. (2018). Coupling transversal and longitudinal models to better predict *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* stand growth under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 258-266.