



MINISTÈRE  
DE L'AGRICULTURE  
DE L'AGRO-ALIMENTAIRE  
ET DE LA FORÊT

## Projet SICFOR

# Du Suivi aux Indicateurs de Changement climatique en FORêt

---

RAPPORT FINAL – Mars 2014

*Daphné Asse et Alice Michelot-Antalik*  
Chargées d'étude

*Guy Landmann*  
Responsable scientifique

Convention n°E32 / 2012

## **Comité de pilotage**

Laetitia POFFET, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

Jérôme DUVERNOY et Sylvain MONDON, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie

Jean-Paul TORRE, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie

## **Équipe projet**

Responsable scientifique : Guy LANDMANN, Directeur-adjoint d'Ecofor

Chargées d'étude « indicateur » : Alice MICHELOT-ANTALIK puis Daphné ASSE, chargées de mission d'Ecofor

Chargé d'étude « systèmes d'information » : Wilfried HEINTZ (Ecofor)

## **Experts ayant contribué au projet**

(participation aux réunions, groupes de travail, et/ou échanges par courriels)

Thierry AMEGLIO (Inra), Frédéric ARCHAUX (Irstea), Vincent BADEAU (Inra), Nathalie BREDA (Inra), Fabien CAROULLE (DSF), Guillaume CHARRIER (UIBK, Autriche), Véronique CHERET (EI Purpan), Isabelle CHUINE (CNRS), Denis COUVET (MNHN), Hendrik DAVI (Inra EFM), Julien DESPLAT (Météo-France), Jean-François DHOTE (ONF), Eric DUFRENE (CNRS), Jean-Luc FLOT (DSF), André GRANIER (Inra), Jean-Christophe HERVE (IGN), Mathieu LAPARIE (Inra), François LEBOURGEOIS (AgroParisTech), Myriam LEGAY (ONF), Jean LEMAIRE (IDF), Jonathan LENOIR (Université Picardie), Benoit MARCAIS (Inra) Luc MAUCHAMP (ONB MEDDE), Serge MORAND (CNRS), Benjamin MORFIN (stagiaire Météo-France), Louis-Michel NAGELEISEN (DSF), Manuel NICOLAS (ONF), Julie PARGADE (CRPF), Yoan PAILLET (Irstea), Céline PERRIER (IDF), Jean-Luc PEYRON (Gip Ecofor), Grégoire PIGEON (Météo-France), Dominique PIOU (DSF), Philippe RIOU-NIVERT (IDF), Christelle ROBINET (INRA), Alain ROQUES (INRA), Emmanuel ROUYER (CRPF), Laurent SAINT-ANDRE (Inra), Jean-Michel SOUBEYROUX (Météo-France), Michel VENNETIER (Irstea).

## **Citation conseillée :**

Asse D., Michelot-Antalik A., Landmann G., 2014. *Projet SICFOR. Du suivi aux indicateurs de changement climatique en forêt.* Paris : Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt - GIP Ecofor. Rapport final, 102 p.

*Projet financé par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt*

## RESUME

Afin d'identifier et de promouvoir les mesures qui permettront de diminuer la vulnérabilité de la société face aux effets du réchauffement climatique, la France a mis en place son premier Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) en 2011. Concernant les écosystèmes forestiers, ce plan prévoit notamment deux mesures complémentaires : la mise en ligne d'indicateurs de changement climatique en forêt (2.3) et la valorisation et l'adaptation du monitoring forestier pour le suivi de la réponse des écosystèmes au changement climatique (2.4).

En France, l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) met à disposition du public un jeu d'indicateurs sur le changement climatique et ses impacts (tous milieux confondus). Le nombre d'indicateurs a progressivement augmenté depuis 2005 pour atteindre environ 25 à ce jour. Parmi eux, un seul indicateur concerne la forêt: le front d'expansion de la chenille processionnaire du pin.

Le projet SICFOR a été mené durant l'année 2013 afin d'établir un jeu d'indicateurs potentiels du changement climatique en forêt. Financé par le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt et coordonné par le GIP Ecofor, il s'est appuyé sur une expertise associant chercheurs, agents du développement et décideurs. Le travail a été structuré en cinq groupes thématiques autour des différents types d'indicateurs : bioclimatiques, phénologiques, productivité et santé des forêts, répartition des espèces, et adaptation de la gestion forestière. Les questions auxquelles les indicateurs potentiels devaient répondre ont été formulées, puis chaque indicateur a été évalué selon une grille construite à partir de modèles existants.

Les principaux résultats du projet SICFOR sont (i) une synthèse des indicateurs du changement climatique disponibles au niveau mondial, en particulier pour les écosystèmes forestiers, (ii) une proposition d'un jeu d'indicateurs potentiels et leur évaluation, (iii) le recensement des données actuellement disponibles pour la construction de ces indicateurs, notamment *via* les dispositifs d'observation existants, et (iv) la présentation des recherches en cours et les limites pour mener à bien les actions sus-mentionnées du PNACC..

# SOMMAIRE

<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET</b>	<b>5</b>
1.1. Contexte et justification	5
1.2. Objectifs et cadre conceptuel	6
1.3. Définitions, typologie et caractéristiques des indicateurs	6
<b>2. SYNTHÈSE DES INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'ÉTRANGER</b>	<b>9</b>
<b>3. ORGANISATION ET MÉTHODES DE TRAVAIL</b>	<b>15</b>
3.1. Définition des groupes de travail	15
3.2. Le mandat des groupes	15
<b>4. INDICATEURS POTENTIELS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FORÊT</b>	<b>17</b>
<b>4.1. Indicateurs bioclimatiques</b>	<b>17</b>
4.1.1. Déficit hydrique des peuplements forestiers	18
4.1.2. Indice IFM « Forêt Météo » (ou feu météo)	21
4.1.3. Autres pistes	21
<b>4.2. Indicateurs phénologiques</b>	<b>22</b>
4.2.1. Dates de feuillaison, de floraison, de maturation des fruits et de coloration des feuilles	23
4.2.2. Autres pistes	24
<b>4.3. Indicateurs de productivité et de santé des forêts</b>	<b>25</b>
4.3.1. Déficit foliaire	25
4.3.2. Mortalité de branches	27
4.3.3. Croissance radiale	27
4.3.4. Mortalité des arbres	28
4.3.5. Stock de carbone des sols	29
4.3.6. Autres pistes	30
<b>4.4. Indicateurs de répartition des organismes</b>	<b>32</b>
4.4.1. Indicateurs de répartition des espèces	33
4.4.2. Décalage entre déplacement réel et attendu de la flore et la faune	34
4.4.3. Présence de l'encre à <i>Phytophthora cinnamomi</i> sur chêne	34
4.4.4. Présence de <i>Dothistroma pini</i> sur pin laricio	35
4.4.5. Expansion du front de la chenille processionnaire du pin	36
4.4.6. Autres pistes	36
<b>4.5. Indicateurs potentiels d'adaptation de la gestion forestière au changement climatique</b>	<b>37</b>
4.5.1. Indicateurs d'évolutions sylvicoles	38
4.5.2. Indicateurs portant sur l'évolution des préconisations	39
4.5.3. Indicateurs sur les efforts de recherche et de formation relatifs au changement climatique	40
<b>5. PRÉSENTATION SYNOPTIQUE DES RESULTATS DU PROJET SICFOR</b>	<b>41</b>
5.1. Les apports du projet SICFOR replacé dans le contexte international	41
5.2. Articulation entre approches thématiques et sources de données	41
<b>DISCUSSION ET CONCLUSION</b>	<b>45</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>48</b>
<b>ANNEXE 1 : LES INDICATEURS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FORÊT : SYNTHÈSE MONDIALE</b>	<b>54</b>
<b>ANNEXE 2 : FICHES D'ÉVALUATION DES INDICATEURS POTENTIELS</b>	<b>58</b>
<b>Liste des sigles et abréviations</b>	<b>102</b>

# 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

## 1.1. Contexte et justification

Selon une enquête CREDOC-SOeS de 2013, les français considèrent que le réchauffement climatique de la planète est le plus préoccupant des problèmes liés à la dégradation de l'environnement (figure 1).

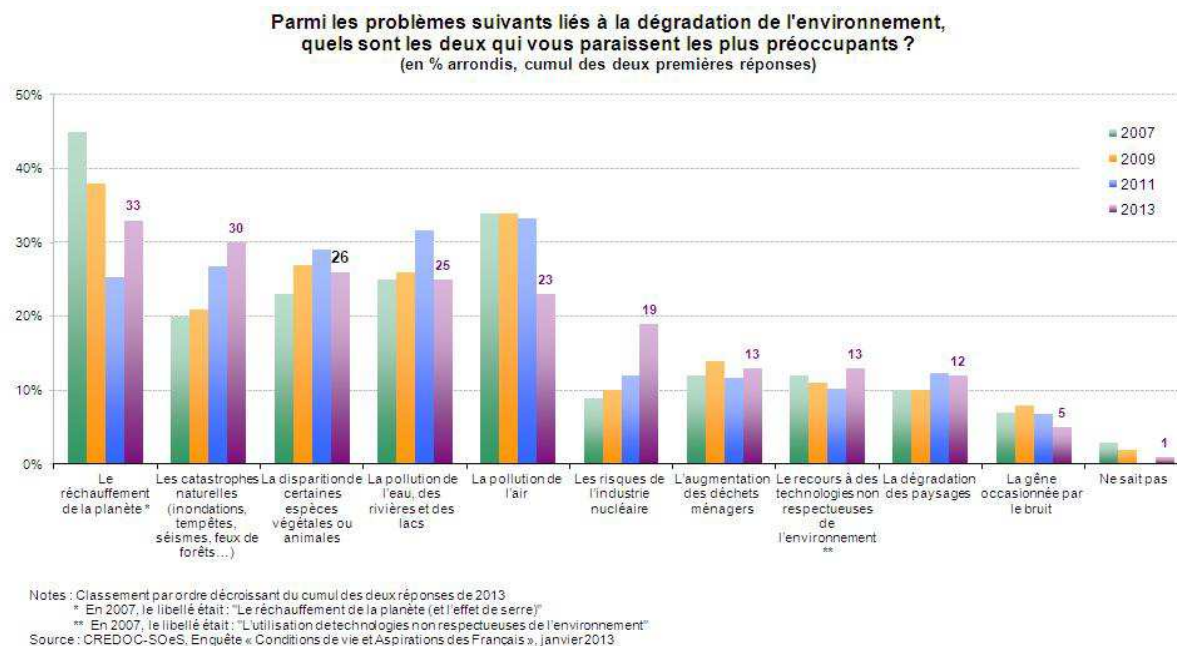


Figure 1 : Perception des français des problèmes liés à la dégradation de l'environnement

Le changement climatique modifie le fonctionnement des forêts et leur diversité biologique, ce qui a et aura des conséquences importantes sur les services écosystémiques tels la production de bois ou la séquestration du carbone.

Afin d'identifier et de promouvoir les mesures qui permettront de diminuer la vulnérabilité de la société face aux effets du changement climatique, la France a mis en place son premier **Plan National d'Adaptation au Changement Climatique** en 2011. Ce plan prévoit entre autres, les trois mesures suivantes dans le domaine forestier :

- 2.2. une description standardisée des sources de données forestières ;
- 2.3. la mise en ligne d'indicateurs de changement climatique en forêt ;
- 2.4. la valorisation et l'adaptation du monitoring forestier pour le suivi de la réponse des écosystèmes au changement climatique.

La mesure 2.3 nécessite une analyse des sources d'information et constitue une des voies de préparation à la réalisation de la mesure 2.4. Le plan prévoit que les deux actions viennent à échéance en 2015, le présent travail constituant, pour la période 2012-2013, une première étape de la mesure 2.3 et une amorce de la mesure 2.4.

En France, l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (**ONERC**) met à disposition du public un **jeu d'indicateurs** sur les impacts du changement climatique (tous milieux confondus). Son travail sur les indicateurs a débuté vers 2005. Depuis, le nombre d'indicateurs a progressivement augmenté, pour atteindre 25 à ce jour. Parmi ceux-ci, le seul indicateur concerne le milieu forestier ; il s'agit du front d'expansion de la chenille processionnaire du pin.

Le projet SICFOR d'une durée d'un an (2013) s'inscrit dans la thématique des indicateurs de changement climatique. Il est financé par le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (**MAAF**), et coordonné par le **GIP Ecofor**.

## 1.2. Objectifs et cadre conceptuel

### Objectifs

L'objectif principal du projet SICFOR est d'établir un **jeu d'indicateurs du changement climatique en forêt** en mettant en œuvre une expertise collective permettant la sélection d'indicateurs représentatifs et variés. Ces indicateurs sont, en premier lieu, destinés aux décideurs et gestionnaires forestiers, et, plus largement, à tous ceux qui s'intéressent à ces questions. Il s'agit également d'**évaluer ces indicateurs potentiels**, ce qui passe notamment par une analyse des dispositifs d'observation nécessaires à leur mise en œuvre. Les indicateurs les plus opérationnels pourront par la suite être intégrés dans différents systèmes d'indicateurs : celui de l'**ONERC**, celui des Indicateurs de Gestion Durable des forêts (**IGD Forêts**) dans lequel la dimension du changement climatique fait encore défaut, ou encore, à plus long terme, celui de l'Observatoire national de la biodiversité (**ONB**), à l'interface entre biodiversité et changement climatique.

### Cadre conceptuel

Le projet SICFOR s'est principalement intéressé aux indicateurs décrivant l'**état** des écosystèmes forestiers sous l'effet du changement climatique, mais la recherche a aussi été étendue à des questions sur la **pression** du changement climatique sur les écosystèmes et à la **réponse** de la société au changement climatique en termes de gestion forestière selon le modèle conceptuel PER « *Pression, État, Réponse* »<sup>1</sup>.

## 1.3. Définitions, typologie et caractéristiques des indicateurs

### Définitions

De façon générale, un **indicateur** :

- est une information (ou variable) associée à un phénomène et permettant d'en indiquer l'évolution dans le temps de façon objective (site internet de l'ONERC<sup>2</sup>);
- peut s'appuyer sur une mesure quantitative, qualitative ou descriptive (d'après Ministry of agriculture and Forestry, 1996), même si la préférence est souvent donnée aux mesures quantitatives ;
- doit être suffisamment simple, politiquement et scientifiquement pertinent, utiles, mesurable et comparable (d'après Montagne-Huck et Niedzwiedz, 2011).

---

<sup>1</sup> Le modèle Pression-État-Réponse (PER), développé par l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE) et adopté par de nombreuses agences au début des années 1990, est encore largement utilisé aujourd'hui. Il a servi de base au développement d'un modèle plus complet : le modèle Déterminants-Pressions-État-Impacts-Réponses (DPSIR).

<sup>2</sup> <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Indicateurs-du-changement,2907-.html>

## Typologie des indicateurs

Dans sa formulation initiale, le projet SICFOR prévoyait d'explorer trois groupes d'indicateurs :

1. les **indicateurs (bio)climatiques** pertinents, basés sur des seuils réputés potentiellement dommageables pour les arbres forestiers.
2. les **indicateurs d'impacts constatés** du changement climatique sur les forêts ;
3. les **indicateurs de vulnérabilité** des forêts).

Un quatrième groupe, les **indicateurs d'adaptation**, étaient mentionné pour mémoire, leur mise en œuvre étant suggérée pour une étape ultérieure.

Ces objectifs ont été discutés en concertation avec les experts lors de la réunion de lancement. Les indicateurs de vulnérabilité ont fait particulièrement débat en raison de la difficulté de définir précisément la vulnérabilité, et cette piste de réflexion n'a pas été poursuivie. Elle mériterait sans doute de l'être, en se basant sur des indicateurs biologiques qui évoluent dans le temps et déterminent l'importance de certains impacts. A titre indicatif, on peut citer l'augmentation de biomasse dans les peuplements ce qui les rend plus vulnérables en cas d'incendie, ou de la hauteur des arbres qui rend les peuplements plus vulnérables aux tempêtes.

A contrario, il a été jugé opportun de lancer dès à présent une réflexion sur les **indicateurs d'adaptation** de la **gestion forestière** au changement climatique.

Les indicateurs d'impact (2) peuvent ensuite se sub-diviser en :

1. **indicateurs d'impacts constatés** ;
2. **indicateurs d'impacts potentiels** : ils indiquent les variations potentielles liées au changement climatique et, le cas échéant, les comparent aux changements constatés ;
3. **indicateurs à seuil(s)** : ils se traduisent par un effet non linéaire voire des ruptures une fois franchis certains seuils. Par exemple, des changements écologiques importants au-delà de certains seuils sont décrits dans le milieu marin et sont connus sous le nom de *ecosystem regim shift* (Gros, 2010).

Cette typologie a été proposée à l'issue d'un séminaire ONERC le 31 janvier 2011 consacré aux indicateurs de changement climatique. Les observations et analyses réalisées depuis une dizaine d'années confirment la pertinence des deux premiers types d'indicateurs (constatés/potentiels) comme la suite du rapport l'illustre, alors qu'il est plus difficile de proposer des exemples d'indicateurs à seuil dans le secteur forestier.

## Caractéristiques d'un indicateur

Dans le cadre du projet, des options ont été prises par rapport à quelques questions importantes :

- *à quelles échelles spatio-temporelles doivent être suivis les indicateurs ?*

La variabilité interannuelle du climat impose de s'appuyer sur une ou plusieurs séries de données couvrant une période suffisamment longue pour **dégager une tendance**. C'est pourquoi l'ONERC emploie le terme « **indicateur** » pour des **séries temporelles longues**, d'au minimum 30 années et le terme « **descripteur** » pour les **séries temporelles courtes**. Dans le cadre de SICFOR, les experts ont considéré que l'échelle de temps est cruciale, mais qu'il est indispensable de mettre en place de nouveaux indicateurs pertinents pour des aspects non couverts même si la série temporelle disponible est inférieure à 30 ans. La question de l'échelle spatiale est à prendre avec un certain pragmatisme : des jeux de données représentatifs à l'échelle nationale reçoivent un intérêt particulier, mais des jeux de données régionaux ou locaux peuvent présenter un grand intérêt pour divers publics (surtout quand leur représentativité peut être évaluée) ;


- *faut-il s'en tenir à des indicateurs basés sur des **mesures** ou prendre en compte des indicateurs issus des **modèles** ?*

Les 25 indicateurs que présente actuellement l'ONERC sont tous issus de données mesurées. Dans le cadre de SICFOR, les experts ont considéré que la priorité devait être donnée aux indicateurs basés sur des mesures. Cependant, la reconstitution de séries passées plus longues que celles dont on dispose avec des modèles bien validés pourrait avoir un intérêt. Elle doit s'accompagner à l'attention du public d'une explication la plus claire possible ;

- *faut-il que les indicateurs retenus traduisent des effets majoritairement causés par le changement climatique, ou élargir la gamme d'indicateurs à des effets dans lesquels différents facteurs interviennent ?*

Cette question de l'**attribution** (à quoi attribue-t-on l'effet observé ?) est difficile à traiter de manière satisfaisante dans la recherche des indicateurs de changement climatique. Ce dernier peut être un élément dominant dans l'impact considéré ; l'indicateur reflète alors fidèlement un déterminant climatique, de manière directe et proportionnelle, ou selon des relations non linéaires. Plus souvent, le changement climatique est un des facteurs en cause, la part relative des différents facteurs est plus ou moins connue, l'importance du changement climatique est plus ou moins forte, mais évoluera plus ou moins à l'avenir. Si on se limite strictement à des indicateurs très fortement liés au changement climatique, cela conduit à restreindre très fortement le champ à certaines fonctions (typiquement la phénologie) et à écarter les fonctions qui sont la résultante de plusieurs influences importantes (ex. : productivité, santé) et, de fait, aussi les plus importantes pour la gestion des forêts. Sur un plan sémantique, on conçoit que l'expression « *indicateur de changement climatique* » n'est réellement pertinente que pour un indicateur très fortement lié au changement climatique et qu'il faut comprendre les autres comme des « *indicateurs de fonctionnement des écosystèmes forestiers soumis, entre autres facteurs, au changement du climat* ».





## 2. SYNTHÈSE DES INDICATEURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ÉTRANGER

Cette synthèse de la bibliographie est ciblée sur la mise en place des indicateurs de changement climatique, les critères de sélection, la façon de les présenter au public, et la place de la forêt parmi ces indicateurs. L'état d'avancement des plans d'adaptation au changement climatique n'est pas abordé. L'annexe 1 résume ce travail sous forme d'un tableau.

Les termes soulignés concernent les aspects forestiers des publications rapportées

### Etats-Unis

L'United States Environmental Protection Agency (EPA)<sup>3</sup> a publié deux rapports, en 2010 et en 2012, sur des indicateurs de changement climatique : « *Climate change indicators in the United States* ». Ces rapports sont essentiellement destinés au grand public.

L'édition 2012 présente 26 indicateurs (24 dans celle de 2010), répartis dans cinq catégories : « *gaz à effet de serre* », « *temps et climat* », « *océans* », « *neige et glace* » et « *société et écosystèmes* ».

Les indicateurs sont principalement sélectionnés selon les critères suivants : qualité des données, objectivité et transparence, facilité à être communiqué, pertinence vis-à-vis du changement climatique.

Chaque indicateur est illustré par plusieurs figures et décrit dans les rubriques suivantes : *points clés* (description des figures), *contexte*, à *propos de l'indicateur* (présentation de l'indicateur), *remarques sur l'indicateur* (ce qu'il faut savoir avant de l'utiliser), et *sources de données*. Enfin, une fiche *Informations techniques* à télécharger donne des détails sur la fréquence d'actualisation, la méthode, l'analyse de la tendance, les sources d'incertitudes et de variabilité, et les limites des données.

Pour caractériser la sécheresse, l'indice de Palmer (indice de sévérité de la sécheresse, calculé à partir des précipitations et des températures récentes) est présenté dans la catégorie « temps et climat ».

Dans la catégorie *société et écosystèmes*, on trouve, en lien (partiel) avec le milieu forestier, un indicateur des dates de débourrement (sortie des feuilles) et de floraison du chèvrefeuille et du lilas ou encore de la longueur de la saison du pollen d'Ambroisie.

### Californie

L'Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA) présente en 2013 un rapport (Kadir *et al.*, 2013) comportant 36 indicateurs de changement climatique répartis selon trois catégories : *les forçages d'origine anthropique du changement climatique*, *le changement climatique à l'échelle de l'État*, et *les impacts du changement climatique sur l'environnement et la population de la Californie*. Ce rapport est une mise à jour d'un précédent rapport, paru en 2009 et comportant 28 indicateurs, (Mazur & Milanes, 2009). Comme au niveau fédéral, ces rapports visent directement le grand public.

L'identification des indicateurs, dérivée de questions, a été guidée par le modèle PER, *Pression, État, Effets, Réponse*. Selon ce modèle, les facteurs qui peuvent altérer le climat seraient considérés comme des « pressions » ou facteurs de changement climatique. Les indicateurs d'état correspondent aux changements observés du climat. Les indicateurs d'effet sont divisés en deux

---

<sup>3</sup> <http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/>

catégories : les indicateurs d'impact sur les systèmes physiques et les indicateurs concernant les systèmes biologiques.

Quatre critères sont utilisés pour la sélection des indicateurs : la qualité des données, la représentativité, la sensibilité et leur intérêt en tant qu'outil d'aide à la décision.

Les indicateurs sélectionnés sont également classés en trois catégories en fonction de la disponibilité des données :

- type I : les données nécessaires sont disponibles et un réseau de suivi est en place ;
- type II : les données générées sont en cours, le suivi systématique est partiellement établi et/ou l'analyse ou la gestion des données supplémentaires est nécessaire ;
- type III : les indicateurs conceptuels pour lesquels aucune surveillance continue ou collecte de données n'est en place.

Pour chaque indicateur un encadré résume les informations importantes. Plusieurs points de description sont récurrents : *référence au précédent rapport, ce que montre l'indicateur, l'importance ou son utilité, les facteurs qui l'influencent, les considérations d'ordre technique* (les caractéristiques et les limites des données), enfin *les références bibliographiques*.

Concernant le milieu forestier, plusieurs indicateurs sont présentés :

- le taux de mortalité des arbres de 1982 à 2004 ;
- la densité des forêts subalpines de la Sierra Nevada (comparaison par type de peuplement des périodes 1929-1934 et 2007-2009) ;
- la surface de forêt brûlée (totale et par type de végétation) en Californie depuis 1950 ;
- les changements d'aires de répartition de la végétation : exemple du canyon profond dans les montagnes de Santa Rosa (comparaison entre 1977 et 2007), du *Pinus ponderosa* depuis 1930 dans les forêts de la Sierra Nevada, et des plantes alpines et subalpines.

## Canada

Le rapport « *Le climat, la nature, les gens : Indicateurs d'évolution du climat au Canada* » publié par le Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME) en 2003 présente 12 indicateurs de changement climatique. Ces indicateurs ont été retenus parmi une centaine d'indicateurs potentiels préalablement étudiés en considérant leur importance pour les gens ou l'environnement ; la fiabilité et la longueur des séries chronologiques (supérieures à 50 ans) des données ; l'influence du climat sur les indicateurs devant être claire et directe et la disponibilité des données sur l'ensemble des régions du Canada.

Les 12 indicateurs sont regroupés dans deux sections. La première rassemble ceux mesurant surtout des répercussions sur la nature ; la seconde, ceux considérant principalement l'impact sur l'homme.

Ce rapport présente chaque indicateur en fonction des quatre éléments suivants : une brève introduction portant sur son importance et sa sensibilité au climat, un cas particulier illustrant les évolutions dans une région et pour une période données, une vue d'ensemble résumant son évolution dans d'autres régions canadiennes ou à l'étranger et prenant en considération certaines de ses conséquences, et un encadré avec des renseignements complémentaires.

Le milieu forestier est présent par le biais d'un indicateur sur la croissance des plantes et le cas particulier de la date du début de floraison du peuplier faux-tremble dans la région d'Edmonton. Une fiche présente de façon générale l'impact que peut avoir le climat sur la croissance et les étapes de développement des plantes.

## Australie

En 2007, l'Australie a adopté un cadre d'action pour l'adaptation au changement climatique. Les indicateurs de changement climatique sont évoqués sur le site internet du Département de l'Environnement du Gouvernement australien, mais aucun exemple précis n'est proposé. C'est sur le site du bureau de météorologie du gouvernement australien<sup>4</sup> que l'on trouve des indicateurs, pour la plupart en lien avec le changement climatique.

Concernant la forêt, on note un graphique (peu commenté) montrant la durée moyenne de la saison de végétation depuis 1910.

## Europe

L'agence européenne de l'environnement (AEE) a publié en 2012 son rapport d'évaluation sur les impacts du changement climatique en Europe et les vulnérabilités associées de la société, la santé et les écosystèmes. Ce rapport constitue un complément et une mise à jour importante du précédent rapport publié en 2008, qui comportait 40 indicateurs.

Les 55 indicateurs de changement climatique du rapport 2012 sont classés selon le modèle DPSIR (Forces motrices, Pression, Etat<sup>5</sup>, Impact, Réponse) et des questions associées. La méthode DPSIR se résume ainsi : « *une force motrice provoque une pression sur l'environnement, caractérisée de façon quantitative et qualitative. Celle-ci se traduit par une modification de l'état général de l'environnement pouvant avoir un impact sur l'homme, l'environnement, l'économie, etc. Cet impact entraîne une réponse de la société qui se traduit à son tour par la mise en œuvre d'instruments qui vont agir sur les quatre éléments précédents* » (Nivet et al. 2012).

Les indicateurs sont également classés selon quatre types :

- des indicateurs descriptifs (type A),
- des indicateurs de performance, reliés à une valeur cible (type B),
- des indicateurs d'efficacité économique (type C),
- des indicateurs d'efficacité politique (type D).

La plupart des indicateurs présentés sont de type A. Un rapport décrit plus en détail la typologie utilisée par l'AEE pour classer les indicateurs (Gabrielsen & Bosch, 2003).

Chaque indicateur est renseigné par les points suivants : *message clé* (résumé des tendances observées et des projections futures) ; *figures pertinentes* ; *pertinence politique, socio-économique et environnementale de l'indicateur* ; *tendance passée basée sur des longues séries de données* ; *projections futures basées sur les résultats existants des modèles* (modèle global de l'IPCC et des scénarios adaptés à la situation de l'Europe) ; *source de données* ; *justification de l'indicateur*. Plus de détails sur la *spécification*<sup>6</sup> de l'indicateur sont également disponibles sur le site internet.

Concernant la forêt, on trouve dans la partie « impacts du climat sur le système socio-économique et la santé » / « forêts et foresterie » du rapport un indicateur de croissance des forêts, et un indicateur des feux de forêts. Un indicateur potentiel du stock de carbone en forêt et un indicateur de santé des forêts sont simplement évoqués.

---

<sup>4</sup> <http://www.bom.gov.au/climate/change/>

<sup>5</sup> Dans la méthode DPSIR le terme « impact » prend un sens particulier puisqu'il signifie « effet de l'état d'un écosystème sur les sociétés humaines ».

<sup>6</sup> Une spécification décrit le plus souvent les points statiques (constants) d'un indicateur : le but de l'indicateur, intérêt général, quelles types de données et graphiques sont à utiliser.

Le site internet<sup>7</sup> présente deux autres indicateurs en lien avec le changement climatique en forêt : dommages des intempéries et des événements liés au climat (dont les feux de forêts) et agriculture et foresterie (indicateur sur le rendement des productions). La présentation de l'indicateur ne comprend pas de figure pour la forêt et le suivi de cet indicateur est interrompu en raison de la disponibilité des données.

## Espagne

L'Agence d'État de Météorologie (AEMet)<sup>8</sup> effectue une surveillance du climat notamment par un suivi des sécheresses à partir d'un indice de précipitation, un suivi du bilan hydrique, un suivi de la phénologie et un suivi du rayonnement solaire et de l'ozone. Un rapport saisonnier concernant le bilan hydrique et la phénologie est proposé mais on n'y trouve pas de graphique d'évolution.

L'agence espagnole pour le changement climatique (OECC) avait prévu la mise en place d'une base d'indicateurs d'impact et d'adaptation au changement climatique pour la période 2009-2012. Pas encore disponible à ce jour, un document est annoncé à brève échéance<sup>9</sup>. En 2012, dans le cadre du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), un rapport à destination du grand public présente les éléments documentés du changement climatique en Espagne (Gutierrez Teira & Ramon Picatoste Ruggeroni, 2012). Plusieurs points peuvent donner une idée des indicateurs potentiels qui seront proposés concernant le milieu forestier : la distribution des espèces, la phénologie ou encore la productivité, les limites altitudinales, les incendies, les dépérissements.

L'observatoire de la santé et du changement climatique (OSCC) prévoit de présenter prochainement des indicateurs d'impact du changement climatique sur la santé humaine<sup>10</sup>.

## Royaume-Uni

En 1999, un rapport publié par le Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) a présenté 34 indicateurs d'impacts du changement climatique au Royaume-Uni (aspects climatiques, socio-économiques et environnementaux, Cannell *et al.*, 1999). Suite au développement d'autres jeux d'indicateurs au niveau européen par l'AEE, l'ensemble de ces indicateurs a été révisé en 2003.

Ces indicateurs sont suivis par l'Environmental Change Network (ECN). Seuls ont été retenus les indicateurs pour lesquels les données sont disponibles sur une période assez longue et lorsque leur sensibilité au climat est démontrée.

Un site internet<sup>11</sup> (non actualisé depuis 2003) présente chaque indicateur selon les rubriques suivantes : *spécificité de l'indicateur*, *pertinence*, *sensibilité au climat et aux autres facteurs*, *changements au fil du temps* (explication des tendances passées et actuelles). Parmi ces 34 indicateurs, deux concernent la forêt : la date d'apparition des feuilles du chêne et la santé du hêtre (densité foliaire) en Grande Bretagne.

Le site (actualisé) de l'ECN<sup>12</sup> propose 9 indicateurs de changement climatique extraits de la liste susmentionnée des 34 indicateurs. Pour chaque indicateur, des courbes d'évolution passée sont proposées en différents points du Royaume-Uni. Aucun ne concerne la forêt.

---

<sup>7</sup> <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/>

<sup>8</sup> [http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/vigilancia\\_sequia?w=0](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/vigilancia_sequia?w=0)

<sup>9</sup> <http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/default.aspx>

<sup>10</sup> [http://www.oscc.gob.es/es/general/indicadores/indicadores\\_es.htm](http://www.oscc.gob.es/es/general/indicadores/indicadores_es.htm)

<sup>11</sup> <http://www.ecn.ac.uk/iccuk/>

<sup>12</sup> <http://www.ecn.ac.uk/indicators>

## Europe du Nord : Danemark, Finlande, Islande, Norvège et Suède

En 1999, un rapport présente un jeu de plus de 50 indicateurs *potentiels* de changement climatique pour les pays nordiques (Brunvoll *et al.*, 1999). Ce travail est issu de la coopération du secteur de l'énergie et de l'environnement du Conseil nordique des ministres et des Services statistiques de Norvège et Suède (Statistics Norway et Statistics Sweden). Ces indicateurs sont classés selon la méthode PER avec une catégorie en plus : les indicateurs de force motrice (ce qui se rapproche de la méthode DPSIR). Dans le milieu forestier, la croissance annuelle des forêts et la production annuelle de bois sont présentées.

En 2009, le rapport « *Signs of Climate Change in Nordic Nature* » a présenté 14 indicateurs de changement climatique pour les pays nordiques (Nordic Council of Ministers, 2009). Ces indicateurs ont été adoptés selon plusieurs critères dont la nature du *lien avec le changement climatique*, et la *mise à jour et la disponibilité des données*.

Chaque indicateur est décrit par un *bref résumé* sur les résultats observés avec l'indicateur, une *présentation* en plusieurs points de l'indicateur, les *neuf critères de qualité* retenus (représentativité pour les régions nordiques, sensibilité au changement climatique, politiques concernées, facilité de compréhension, pertinence pour l'écosystème, reconnaissance scientifique, caractère quantitatif des données, disponibilité d'une série chronologique de données, comparaison possible avec d'autres pays), la *méthodologie*, et une ou deux *illustrations*.

Dans le rapport, ces indicateurs sont classés selon la méthode DPSIR.

Parmi ces indicateurs, on peut trouver en lien avec le milieu forestier :

- la durée de la saison de végétation ;
- la date de début de la saison de végétation ;
- la date de début de la pollinisation du bouleau ;
- les limites altitudinale et latitudinale de présence des arbres.

## Allemagne

Le gouvernement allemand a adopté la stratégie allemande pour l'adaptation au changement climatique (Deutsche Anpassungs Strategie – DAS) en 2008.

Le Plan d'Action pour l'Adaptation au Changement Climatique de 2011 prévoit l'élaboration d'un jeu d'indicateurs permettant de décrire les impacts du changement climatique ainsi que les mesures d'adaptation. Pour développer et promouvoir la mise en œuvre de la DAS, le centre KomPass<sup>13</sup> du UBA (Umweltbundesamt, ministère allemand de l'environnement) a été créé. Il est spécialisé dans la diffusion des connaissances sur le changement climatique vers le grand public, assure un appui-conseil aux agences gouvernementales, coordonne des activités de recherche et anime un réseau d'expertise. L'un des projets de KomPass est d'établir une liste d'indicateurs dans le cadre du projet de la DAS (2009-2014). Les indicateurs sont identifiés en collaboration avec des experts des autorités fédérales et des Länder ainsi que des experts du monde universitaire et de l'économie. Les résultats obtenus doivent être incorporés prochainement dans un premier rapport basé sur des indicateurs sur l'adaptation au changement climatique en Allemagne.

---

<sup>13</sup> <http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/climate-energy/climate-change-adaptation/kompass>

## Suisse

L'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse<sup>14</sup> dispose de plusieurs réseaux de stations de suivi dont un réseau de mesure des pollens et un réseau phénologique.

La Suisse dispose de deux longues séries phénologiques : la plus ancienne concerne l'apparition de la première feuille de marronnier à Genève, observée depuis 1808, et la seconde série la date de floraison des cerisiers près de Liestal, notée depuis 1894. Le réseau d'observation phénologique suisse a été mis en place au début des années 1950 ; les dates de 10 stades de croissance sont notées sur neuf espèces de plantes dans environ 80 stations d'observation.

En 2007, l'Office fédéral de l'environnement a publié un rapport sur les indicateurs de changement climatique en Suisse (North *et al.*, 2007). Pour la forêt, on trouve dans la partie « *Conséquences pour l'espace naturel* », la propagation du palmier chanvre (espèce envahissante) en Suisse méridionale. Dans la partie « *Réponses apportées au changement climatique* » l'adaptation de la gestion sylvicole est discutée, et un tableau présente les surfaces forestières selon le degré de mélange.

## France

Outre le site de l'ONERC, principale référence en matière d'indicateurs du changement climatique<sup>15</sup>, un site internet français, ClimObs<sup>16</sup> propose depuis 2011 de rendre accessible à un public large les données scientifiques du changement climatique. Ce site internet qui se présente comme le premier observatoire francophone du changement climatique est réalisé par Universcience, un établissement public né de la fusion du Palais de la découverte et de la Cité des sciences et de l'industrie. Parmi les nombreux indicateurs de changement climatique affichés, un seul concerne pour partie les écosystèmes forestiers : il s'agit de la productivité primaire continentale (anomalie de 2000-2010). Les internautes sont en outre invités à se rendre sur le site de l'ONERC.

**En résumé**, la mise en place d'indicateurs du changement climatique s'est développée peu à peu dans une quinzaine de pays (nombre sans doute sous-estimé) aux cours des années 2000, et plus nettement depuis 2007, en lien notamment avec l'établissement en Europe des Plans d'adaptation au changement climatique. Il ressort assez nettement de cette analyse que l'établissement d'une liste d'indicateurs du changement climatique est un exercice délicat. Aux Etats-Unis ou pour l'AEE, les rapports utilisant assez largement ces indicateurs sont actualisés en fonction des avancées scientifiques, au plus tous les 5 ans. Dans ces cas, on note une augmentation progressive du nombre d'indicateurs alors que chez certains précurseurs dans le domaine (premiers travaux dès les années 1990) comme le Royaume-Uni et les pays nordiques, on note parfois une réduction drastique du nombre d'indicateurs (sans doute en raison de la difficulté de mise en œuvre). L'Australie, l'Espagne, ou encore l'Allemagne devraient très prochainement publier eux aussi des indicateurs de changement climatique.

Pour l'ensemble de ces pays, la validation des indicateurs se base notamment sur des séries de données mesurées relativement longues et une sensibilité forte vis-à-vis du climat. De manière générale, la majorité des indicateurs portent sur l'atmosphère et le climat, la cryosphère et les écosystèmes marins alors que les écosystèmes terrestres sont nettement moins couverts.

---

<sup>14</sup> [http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat\\_en\\_suisse/phenologique.html](http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat_en_suisse/phenologique.html)

<sup>15</sup> <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Indicateurs-du-changement,2907-.html>

<sup>16</sup> <http://www.universcience.fr/climobs/>



## 3. ORGANISATION ET METHODES DE TRAVAIL

Dans un premier temps, le travail a consisté à formuler les **questions** auxquelles on souhaite répondre avec les indicateurs. Il existe quelques cadres conceptuels qui permettent de définir ces questions, comme parmi eux les méthodes PER ou DPSIR.

### 3.1. Définition des groupes de travail

A l'issue de la réunion de lancement du 25 mars 2013, il a été convenu d'organiser la réflexion par **groupes de travail** pour chaque **catégorie thématique d'indicateur**. Les groupes de travail suivants ont été proposés :

1. **Indicateurs bioclimatiques** : ces indicateurs sont calculés à partir de variables climatiques et influencent fortement le fonctionnement des écosystèmes forestiers (ex : indice de déficit hydrique en eau du sol, pluies – évapotranspiration potentielle, somme des degrés jours...). Ce groupe prend en compte les derniers développements réalisés par Météo France, notamment sur les aspects pluviométriques.
2. **Indicateurs phénologiques** : ce sont des indicateurs de l'évolution de la phénologie (principalement foliaire) des arbres forestiers qui sont les plus directement reliés au changement climatique (ex : date de débourrement, date de floraison, durée de la saison de végétation...).
3. **Indicateurs de productivité (a) et santé (b)** : ce sont des indicateurs d'état de l'évolution de la productivité (ex : croissance, séquestration du carbone) et de la santé des écosystèmes forestiers sous l'effet du changement climatique.
4. **Indicateurs de répartition des organismes** : ce sont des indicateurs d'état de l'évolution de la répartition de la flore et de la faune forestière, et de la composition en espèces sous l'effet du changement climatique.
5. **Indicateurs d'adaptation de la gestion forestière au changement climatique** : ce sont des indicateurs de réponse de la société (en termes de gestion forestière) pour assurer la résilience des écosystèmes forestiers et le maintien des fonctions de la forêt sous l'effet du changement climatique. La démarche de ce groupe est plus prospective que les autres.

### 3.2. Le mandat des groupes

Les groupes, constitués de **3 à 5 experts** (davantage dans les dernières étapes du travail) ont interagi avec un **groupe de coordination** (composé d'Alice Michelot-Antalik puis remplacée par Daphné Asse, Guy Landmann et du comité de pilotage), ce qui a permis :

1. de définir les termes employés, le cadre conceptuel et les méthodes les plus appropriées au projet ;
2. d'identifier les grandes questions relatives aux indicateurs en s'aidant du cadre conceptuel retenu;
3. de répertorier les réseaux expérimentaux et les observatoires
4. de fournir une grille d'évaluation avec des critères scientifiques et techniques des indicateurs potentiels. Cette grille d'évaluation, adaptée aux demandes du comité de pilotage, a été construite en s'inspirant des grilles de l'ONB (conçue pour des indicateurs déjà mis en œuvre), des indicateurs de gestion durable et du projet Questind (Doriz *et al.*, 2013).

En fonction des questions relatives aux indicateurs, d'autres experts ont été sollicités pour leurs connaissances dans le domaine en question. Au sein de chaque groupe, une personne a été désignée comme « personne-relais » afin de faciliter les interactions au sein du groupe. La majorité des échanges ont été faits par échanges mails où téléphoniques. Un espace de travail sous Google drive a été créé regroupant les différents fichiers concernant le projet et permettant de faciliter les échanges et les réflexions :

Une réunion de restitution a été organisée le 14 novembre 2013 afin de rassembler les différents groupes de travail et discuter des avancées du projet en vue de la synthèse finale. Des échanges complémentaires par courriel ont eu lieu après cette réunion, ils ont été pris en compte par les auteurs dans la mesure du possible.

### 3.3. Les critères retenus pour évaluer les indicateurs

L'annexe 2 donne le détail des informations fournies par les groupes de travail pour les indicateurs potentiels proposés. A noter que ces fiches n'ont pas fait l'objet de modifications si les discussions collégiales ont fait apparaître des limites non détectées et décrites dans les fiches.

Les descriptions données dans ces fiches n'ont pas – par manque de temps – été modifiées après la réunion de restitution du projet, même quand cette dernière a conduit à nuancer ou modifier certaines appréciations qu'elles comportent. Ce travail devra être fait, le cas échéant, dans le prolongement du projet SICFOR.

La fiche type utilisée (cf. Annexe 2) pour décrire et évaluer les différents indicateurs proposés comporte une trentaine de rubriques (de présentation et d'évaluation) classées en 6 grandes catégories :

- **identification** : présentation générale de l'indicateur,
- **données et échelles** : renseignement du protocole, représentativité spatiale et temporelle,
- **méthodes de calcul**,
- **signification** : explication du lien avec le changement climatique, représentativité de l'indicateur en termes de fonctionnement des forêts, liens avec des services écosystémiques, facteurs autres que climatique qui sont reliés à l'indicateur, forme de présentation,
- **validité** : renseignement sur la fiabilité des données, les conditions de validité, les réserves et avantages scientifiques, la sensibilité et réactivité, la précision et robustesse,
- **limites et perspectives** : disponibilité actuelle de l'indicateur, verrous pour le rendre accessible et moyens nécessaires à son développement.

La partie 4 du rapport décrit de manière synthétique la situation de chaque indicateur proposé, en intégrant le résultat des discussions collégiales et sans revenir à chacun des critères d'évaluation. L'ensemble des résultats du projet SICFOR est ensuite présentée de façon synoptique en partie 5.





## 4. INDICATEURS POTENTIELS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FORET

Dans cette partie, les démarches de réflexions issues des groupes de travail seront présentées. Après avoir défini les différentes questions amenant aux indicateurs, ces derniers seront un à un décrits.

Pour chaque groupe de travail, les informations présentées sont :

- la composition du groupe de travail,
- les questions formulées,
- les indicateurs potentiels évalués, avec pour chacun une synthèse en 3 parties : données, intérêts de l'indicateur, limites et perspectives.

### 4.1. Indicateurs bioclimatiques

Composition du groupe de travail :

- ❖ Vincent Badeau, UMR EEF, Nancy (personne relais)
- ❖ Nathalie Bréda, UMR EEF, Nancy
- ❖ Eric Dufrêne, UMR ESE, Orsay
- ❖ Jean Lemaire, IDF, Lyon
- ❖ Benjamin Morfin, stagiaire Météo-France, Dijon
- ❖ Grégoire Pigeon, Météo France, Toulouse

Parmi les questions formulées, on peut identifier celles à partir desquelles on peut espérer décliner des indicateurs de changement climatique en forêt :

- *Comment évolue les variables bioclimatiques<sup>17</sup> ayant un effet direct sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers ?*
- *Comment évolue l'aléa climatologique<sup>18</sup> des feux de forêt ?*

Une autre question relève d'une problématique de recherche plus large :

- *Comment évolue le climat en forêt (mesures en clairières ou sous couvert) en comparaison du climat mesuré sur les stations Météo France ?*

#### **INDICATEURS POTENTIELS EVALUES :**

- ✓ **DEFICIT HYDRIQUE DES PEUPEMENTS FORESTIERS**
- ✓ **INDICE FORET METEO (OU FEU METEO)**

Ces deux indicateurs potentiels sont analysés ci-après. D'autres pistes sont ensuite plus rapidement commentées.

---

<sup>17</sup> Ensemble des variables caractéristiques d'un climat qui influence directement les êtres vivants.

<sup>18</sup> Un évènement climatique ou d'origine climatique susceptible de se produire (avec une probabilité plus ou moins élevée) et pouvant entraîner des dommages sur les populations, les activités et les milieux.

### 4.1.1. Déficit hydrique des peuplements forestiers

#### DONNEES

Le modèle Biljou© (Granier *et al.*, 1999) calcule au pas de temps journalier l'ensemble des flux élémentaires d'eau qui entrent et sortent du peuplement : interception des précipitations par le couvert, transpiration des arbres, évapotranspiration du sol et de la strate herbacée, drainage au-delà de la zone d'enracinement. L'évolution journalière de la réserve en eau du sol étant simulée, différents indicateurs de sécheresse peuvent être calculés sur la base des connaissances écophysiologiques de la réponse des arbres et des couverts au déficit hydrique du sol. L'**indice de déficit hydrique** annuel produit par Biljou© caractérise :

- la **date de début de stress**, correspondant au jour de l'année à partir duquel le manque d'eau dans le sol induit une régulation de la transpiration ;
- le **nombre de jour de stress**, correspondant au nombre de journées pendant lesquelles les peuplements ont été en situation de contrainte hydrique. Ces indicateurs ont été calculés pour tout le territoire métropolitain sur une maille systématique de 8 x 8 km (correspondant au maillage SAFRAN<sup>19</sup>) et pour la période 1959-2011 ;
- l'**intensité du stress** pendant la période de végétation, cette dernière variable étant la plus intégrative.

**Le modèle est validé** sur les variables du bilan de la réserve en eau relative (REW), état de remplissage du réservoir en eau du sol (Granier *et al.*, 1999 ; Granier *et al.*, 2007), qui résulte jour par jour de l'eau qui entre et qui sort de l'écosystème. Chaque flux d'eau élémentaire (transpiration de l'arbre, interception des pluies, évaporation du sol et de la strate herbacée, drainage) a été validé (Bréda *et al.*, 1993, 1995, Peiffer 2005 ; Granier *et al.*, 2007 ; Bréda *et al.*, 2006 ; Granier *et al.*, 2000).

**Les indices de déficit hydrique** produits par Biljou© sont **validés** par leur pouvoir explicatif sur :

- la croissance radiale (Badeau *et al.*, 1995, Michelot *et al.*, 2012, Sergent *et al.*, 2012, Asse, 2013) ;
- la productivité primaire nette (NEE) des forêts en Europe (Granier *et al.*, 2007) et la perte de productivité entre 2002 et 2003 (Granier *et al.*, 2007) ;
- l'accroissement en biomasse (Granier *et al.*, 2008) ;
- la reconstruction du climat passé à partir des isotopes du bois (Raffali-Delerce *et al.*, 2004).

Le modèle Biljou© permet de caractériser des sécheresses annuelles en prenant en compte le fonctionnement des interfaces sols/racine et couvert/atmosphère. Des recherches sont encore nécessaires pour caractériser de manière plus précise la réserve utile sur le territoire (données sols). Cependant le modèle fonctionne déjà à l'échelle nationale avec plusieurs hypothèses de réserve utile, de type de couvert et d'indice foliaire, ce qui permet d'évaluer l'**intensité annuelle des sécheresses** sur le passé récent pour une gamme de types de gestion (couvert feuillu à LAI élevé sur des sols à forte réserve utile, couvert de conifères à faible LAI sur des sols à faible réserve utile, etc.).

---

<sup>19</sup> SAFRAN/France est un système d'analyse à mésoéchelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques. Ces paramètres (température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident), sont analysés par pas de 300m d'altitude et sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). (<http://www.cnrn.meteo.fr/spip.php?article424>)

## INTERETS DE L'INDICATEUR

Parallèlement aux travaux de l'UMR EEF, Météo-France a développé dans le cadre du projet CLIMSEC<sup>20</sup> (2008-2011) des indices de sécheresse sur la France métropolitaine. L'objectif était de caractériser l'impact du changement climatique sur l'humidité des sols en s'appuyant sur les données mésoéchelle SAFRAN, et de produire de nouveaux outils pour les services en charge du suivi climatique. Les calculs d'état hydrique des sols ont été réalisés par la chaîne SIM : SAFRAN (forçage climatique) - ISBA (modèle de bilan d'énergie couplé à un schéma de surface) - MODCOU (modèle hydrologique).

L'**indice standardisé de sécheresse « agricole » (SSWI)** produit par cette chaîne est en phase d'intégration à la liste de l'ONERC (Soubeyroux *et al.*, 2012). Basé sur l'indice d'humidité du sol (Soil Wetness Index - SWI), il est calculé comme le pourcentage moyen de la surface du territoire où l'on a observé des conditions anormales d'humidité moyenne du sol au pas de temps mensuel. Cet indice permet d'appréhender le niveau global atteint par une sécheresse à l'échelle de la France métropolitaine. La couche de sol prise en compte concerne toute la couche de l'hydrologie de surface, c'est-à-dire non seulement la zone enracinée par les végétations mais aussi le compartiment de sol sous-jacent qui alimente les cours d'eau et les nappes superficielles. Contrairement à d'autres indices de déficit hydrique du sol, il n'y a pas ici de notion d'intensité des sécheresses.

L'indice SSWI proposé par Météo-France et l'indice de déficit hydrique proposé par l'Inra UMR EEF ne sont donc **pas redondants** : ils caractérisent un manque d'eau dans deux couches de sols différentes, la zone enracinée dans le cas de Biljou© et la cette couche étendue au compartiment sous-jacent, qui contribue à l'alimentation des nappes et des cours d'eau.

## LIMITES ET PERSPECTIVES

L'importance des sécheresses pour la croissance et la vigueur des peuplements forestiers dans un contexte de changement climatique incite à développer des indicateurs robustes d'un point de vue scientifique et de les rendre accessibles aux gestionnaires de la forêt à l'image de ce qui a été fait dans le monde agricole. Ce développement peut être envisagé selon deux stratégies non exclusives :

- la production de **chroniques temporelles** d'évolution des niveaux ou de durées de **stress hydriques** « bruts » supportés par les forêts, pas nécessairement spatialement explicites. Un exemple de séries temporelles est donnée dans la figure 2 ci-dessous ;
- proposer **une présentation spatialement explicite**, en anomalie, en référence à un niveau de sécheresse moyen sur le point géographique considéré ou une zone de territoire. Cette option a l'avantage de pondérer les indicateurs selon les situations pédoclimatiques. Fixer des seuils de gravité pour des types d'essences et de peuplements reste cependant un travail à réaliser.

Les calculs de bilan hydrique ont été réalisés jusqu'à présent en fixant plusieurs paramètres (travail sur hypothèses) ce qui permet d'illustrer l'influence des différents facteurs déterminants pour les calculs de bilan hydrique (nature des couverts, indice foliaire des peuplements, phénologie, réserve utile en eau des sols). De nouvelles simulations peuvent être réalisées en incluant des réserves utiles plus réalistes pour les territoires forestiers grâce aux travaux réalisés dans le cadre du projet GICC-FAST<sup>21</sup> (coord. A. Granier, 2009-2013).

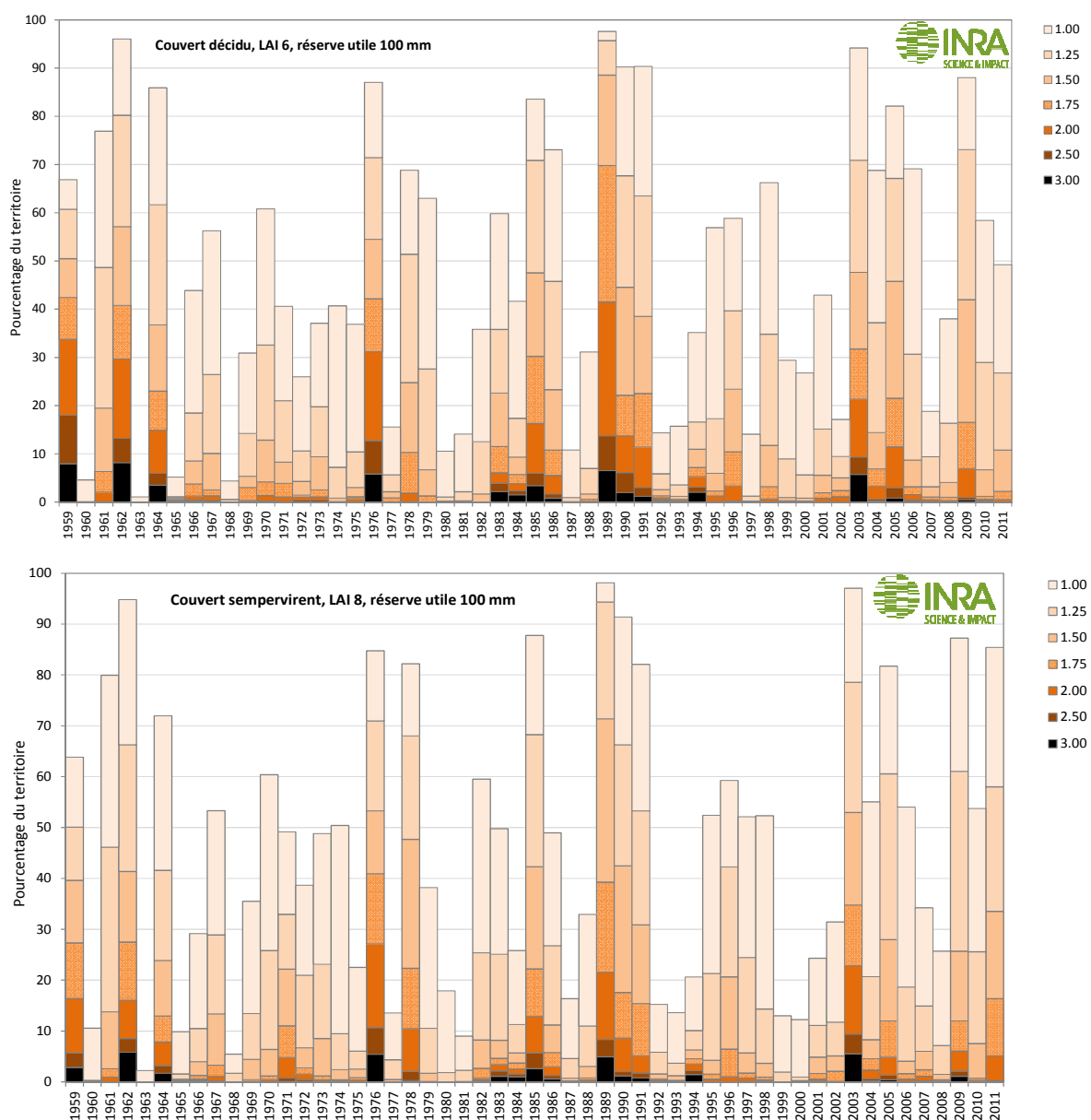
Un post-traitement de ces données est cependant nécessaire pour évaluer le grain optimal d'agrégation des données de réserve utile : à l'échelle de la maille climatique 8 x 8 km ; à l'échelle des sylvo-écorégions ou des anciennes petites régions IFN ; à l'échelle des Unités Cartographiques

---

<sup>20</sup> [http://www.cnrm-game.fr/IMG/pdf/2011\\_fmaif\\_rapport\\_final\\_v2.2.pdf](http://www.cnrm-game.fr/IMG/pdf/2011_fmaif_rapport_final_v2.2.pdf)

<sup>21</sup> <http://www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/318>

des Sols au 1/1 000 000 ou au 1/25 000. Cette réflexion méthodologique sur la construction de cartes de réserves utiles pour les sols forestiers et le recalcul de bilans hydriques nécessite un investissement particulier (estimé à un an de travail d'ingénieur).



**Figure 2.** Superficie du territoire affectée par la sécheresse (en % de la France) pour 7 niveaux d'intensité de déficit hydrique (Biljou©) et pour deux types de couvert forestiers. L'échelle correspond au rapport de l'indice de stress annuel à l'indice de stress moyen pour la période 1959-2011 :

- 1.00 : sécheresse supérieure à la normale (> + 1 %)
- 1.25 : sécheresse au moins 1,25 fois plus forte que la normale (> + 25 %)
- 1.50 : sécheresse au moins 1,5 fois plus forte que la normale (> + 50 %)
- 1.75 : sécheresse au moins 1,75 fois plus forte que la normale (> + 75 %)
- 2.00 : sécheresse au moins 2 fois plus forte que la normale (> +100 %)
- 2.50 : sécheresse au moins 2,5 fois plus forte que la normale (> + 150 %)
- 3.00 : sécheresse au moins 3 fois plus forte que la normale (> + 200 %)

Exemple : pour un type de couvert «sempervirent», la sécheresse de 1989 a été supérieure à la normale pour 98 % de la surface de la métropole et sur 21,5% du territoire on a observé des sécheresses au moins deux fois supérieures à la normale. En 1981, ce n'est que 9 % du territoire qui a été touché par des sécheresses supérieures à la normale.

### 4.1.2. Indice IFM « Forêt Météo » (ou feu météo)

Cet indicateur est en cours d'intégration dans le jeu d'indicateurs de l'ONERC en 2014.

#### DONNEES

L'Indice Forêt Météo ou IFM est un indicateur composite issu des travaux de Van Wagner et Pickett (1985) au Canada. Cet indicateur basé sur un modèle empirique permet de définir si la situation climatique est devenue ou deviendra plus ou moins favorable à l'occurrence de feu. Les réseaux d'observations météorologiques nationaux et systèmes numériques de réanalyse climatique et de projection climatique disposent des données depuis 1958. L'IFM dépend de paramètres météorologiques :

- l'humidité de l'air en début d'après-midi (le moment où elle est la plus basse) ;
- la température en milieu d'après-midi (le moment où elle est la plus haute) ;
- les précipitations sur 24 h (de midi à midi) ;
- la vitesse maximale du vent moyen.

Ces informations sont utilisées pour évaluer à la fois l'indice de la propagation initiale et l'indice du combustible disponible. Le calcul de ces indices est une étape nécessaire pour obtenir l'IFM. L'indice peut donc être déduit des prévisions météorologiques pour le lendemain et plusieurs jours à venir.

#### INTERETS DE L'INDICATEUR

Robuste, l'indicateur est largement éprouvé. Il est utilisé dans plusieurs régions du monde et notamment en Europe par la Commission européenne. En France, il est calculé quotidiennement pour le compte de la Sécurité Civile. Il a été plus largement développé dans le cadre d'une mission interministérielle en 2010 « Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts » (Chatry *et al.*, 2010).

#### LIMITES ET PERSPECTIVES

Au-delà du **risque d'incendie** que l'IFM quantifie, il serait intéressant de considérer le lien entre le changement climatique et les dégâts occasionnés par le feu. Cet aspect a été discuté dans le groupe « productivité et santé des forêts ». Compte-tenu du fait qu'une très grande majorité des incendies sont causés par des activités humaines et que la maîtrise de la lutte permet de limiter les surfaces incendiées, il semble *a priori* difficile d'identifier le signal « changement climatique » dans l'évolution actuelle des incendies de forêts, et donc de proposer un indicateur opérationnel).

La modélisation de l'enveloppe bioclimatique du risque d'incendie en fonction de la végétation, du climat, et des relations entre les activités humaines et le risque d'incendie, constitue par contre un travail de recherche très pertinent et à renforcer.

### 4.1.3. Autres pistes

#### P-ETP

L'indicateur Pluie-ETP (évapotranspiration potentielle) est un indicateur proposé par Jean Lemaire (IDF) qui n'a pas été renseigné à ce stade. Cet indicateur correspond au déficit climatique (ne prend en compte que des paramètres climatiques) et vise une utilisation directe par les gestionnaires de terrain (Morfin, 2013). Il ne faut pas le confondre avec le déficit hydrique des peuplements (décrit en 4.1.1) qui correspond à la sécheresse édaphique, c'est-à-dire au manque d'eau dans le sol pour la végétation.

## Nombre de jours de gel

Ce paramètre est un indicateur déjà intégré dans la liste de l'ONERC<sup>22</sup> (rubrique « atmosphère et climat »). Les données sont disponibles depuis 1900, sur une cinquantaine de stations sur le territoire métropolitain. La durée de la période gel est aussi une donnée disponible à Météo-France. Si on admet que cet indicateur a une influence non négligeable sur la dormance des végétaux et les contraintes pour les pathogènes, il reste très fruste et ne peut rendre compte des mécanismes physiologiques impliqués dans les dégâts causés par le froid (voir partie 4.3.6).

## 4.2. Indicateurs phénologiques

Composition du groupe de travail :

- ❖ Isabelle Chuine, UMR CEFE, Montpellier (personne relais)
- ❖ Véronique Chéret, ESA Purpan
- ❖ Hendrik Davi, UR EFM, Avignon
- ❖ François Lebourgeois, UMR LERFoB, Nancy
- ❖ Michel Vennetier, UR EMAX, Aix-en-provence

Parmi les questions formulées, on peut distinguer celles à partir desquelles on peut espérer décliner directement des indicateurs de changement climatique en forêt :

- *Comment évolue la phénologie<sup>23</sup> foliaire des arbres forestiers sous l'effet du changement climatique ?*
- *Comment évolue la durée de saison de végétation des différentes essences temporellement et spatialement ?*

Et celles qui relèvent de la recherche et de l'évaluation des indicateurs potentiels :

- *Comment évolue la sensibilité de la phénologie aux paramètres climatiques ?*
- *Peut-on établir un lien entre phénologie et vulnérabilité<sup>24</sup> ?*
- *Quels apports de la télédétection dans le suivi de la phénologie et la production d'indicateurs ?*

### INDICATEURS POTENTIELS EVALUES

- ✓ **DATES DE FEUILLAISSON**
- ✓ **DATES DE FLORAISON**
- ✓ **DATES DE MATURATION DES FRUITS**
- ✓ **DATES COLORATION DES FEUILLES**

Ces indicateurs potentiels sont analysés ci-après. D'autres pistes sont ensuite plus rapidement commentées.

---

<sup>22</sup> <http://onerc.developpement-durable.gouv.fr/fr/indicateur/nombre-de-jours-de-gel>

<sup>23</sup> Etude chronologique des manifestations visibles du développement des végétaux en lien avec les conditions climatiques : floraison, débournement, feuillaison, maturation, sénescence etc.

<sup>24</sup> Notion relative qui se définit par rapport à des seuils, des témoins ou des références. La vulnérabilité d'un système est sa fragilité face à un aléa et en particulier sa capacité à surmonter la crise après l'aléa.

## 4.2.1. Dates de feuillaison, de floraison, de maturation des fruits et de coloration des feuilles

### DONNEES

Le GDR CNRS 2968<sup>25</sup> a constitué depuis 2006 une base nationale de données phénologiques qui est accessible en ligne à tous. Cette base compile toutes les observations qui ont pu être faites, toutes espèces confondues (animales et végétales) en France. Les plus anciennes données datent de 1349 (vigne), les plus anciennes données sur des essences forestières remontent à 1872. Cette base est alimentée chaque année par de nouvelles données contemporaines, elle contient à ce jour environ 160 000 données sur 612 espèces et 971 sites.

Au sein du réseau RENECOFOR<sup>26</sup>, des relevés phénologiques sont réalisés depuis 1997. Les données sont relevées pour 90 peuplements répartis sur l'ensemble du territoire (pour 10 espèces). Ces données ont permis de mettre en évidence les variations phénologiques des principales essences forestières et de générer les cartes des dates moyennes de certaines phases phénologiques sur le territoire (Lebourgeois, 2008).

Parmi les données phénologiques d'espèces forestières plus anciennes mais hors conditions forestières ordinaires, il y a les relevés de phénologie des vergers à graines (douglas ou mélèze) réalisés dans le cadre des dispositifs d'amélioration génétique (et intégrés dans la base de données du GDR). Les données remontent à environ 30 ans, mais ne correspondent pas à des mesures annuelles (rythme imposé par la gestion expérimentale, comm. pers. J.-C. Bastien, Inra).

### INTERETS DE CES INDICATEURS

Ces indicateurs permettraient de visualiser les impacts du changement climatique sur le cycle de développement des arbres et ses conséquences fonctionnelles. La date de **feuillaison** et de **coloration des feuilles** sont des variables impliquées dans le cycle du carbone et de l'eau, la croissance, la survie et le succès reproducteur de l'arbre. La date de **floraison** et de **fructification** sont impliquées dans le succès reproducteur de l'arbre.

Ces quatre indicateurs sont reliés directement avec la température (relation de causalité directe). Les modifications de la phénologie des espèces conduiront à une évolution des aires de répartition. En 2050, en se fondant sur une évolution linéaire des variables phénologiques avec le réchauffement climatique, les feuilles des arbres pourraient se déployer 27 à 54 jours plus tôt qu'aujourd'hui (projet CARBOFOR, coordonnée par Lousteau D. ; Chuine I., 2004). Cependant, les relations entre les modifications des conditions climatiques et les évolutions de la phénologie seront probablement non linéaires avec l'intervention possible d'effets de seuil. Il est important de garder en tête que pour certaines espèces ayant besoin d'une exposition au froid, la date de feuillaison pourrait être retardée par les températures plus élevées.

### LIMITES ET PERSPECTIVES

Les données du système d'information phénologie (SIP-GEPP) peuvent fournir la base pour l'élaboration d'indicateurs phénologiques pour la forêt mais cela nécessite un travail approfondi d'analyse statistique des données qui s'organisent en séries temporelles plus ou moins longues dans différents sites d'observation acquises par différents observateurs de différents événements phénologiques chez différentes espèces. Par exemple, l'unité Biostatistique et Processus Spatiaux

---

<sup>25</sup> [www.gdr2968.cnrs.fr](http://www.gdr2968.cnrs.fr)

<sup>26</sup> <http://www.onf.fr/renecofor/@@index.html>

(BioSP<sup>27</sup>, Inra Avignon) serait en mesure de réaliser ce travail. Il s'agirait d'identifier les espèces pour lesquelles une construction d'indicateurs serait possible, puis de mettre au point la méthode de construction des indicateurs.

Ce travail pourrait également être fait pour des zones géographiques particulières comme les massifs montagneux. Les données du CREA (Centre de Recherche des Écosystèmes d'Altitude), qui font partie de la base phénologie, pourraient permettre de construire des indicateurs pour le massif des Alpes.

Une piste complémentaire est d'utiliser des modèles pour la **reconstitution du passé proche** (au moins jusqu'à la période supposée d'intervention du changement climatique récent). La tâche de reconstruction du passé est au stade de recherche mais on n'exclut pas qu'un indicateur basé sur des mesures « actuelles » puisse présenter aussi une série reconstituée avec une précision « correcte ». Concernant la phénologie, les reconstructions que l'on pourrait faire pour le passé seraient plus fiables que les projections qui pourraient être faites pour le futur, l'erreur faite sur ces reconstructions pouvant être estimée.

Sur les données du réseau RENECOFOR, il pourrait ainsi être envisagé de calibrer un modèle sur la période actuelle (1997-2012/2013) et d'appliquer ce modèle aux séries climatiques anciennes, en prenant soin de définir les intervalles. On pourrait par la suite confronter ces modèles aux observations anciennes disponibles dans la base. Ce genre de démarche pose bien sûr des problèmes de méthodologie (précision de l'observation notamment). La mise en avant de ces données issues de modèle nécessiterait des mises en garde du public. Sur le même principe, des reconstitutions peuvent être également faites sur d'autres données du GDR, au prix toutefois d'un travail conséquent mais intéressant. L'exercice pourrait être fait pour une espèce afin de pouvoir estimer le travail à fournir et les erreurs qui en ressortent.

#### 4.2.2. Autres pistes

##### Apport de la télédétection à la phénologie

Le groupe de travail n'avait pas pour ambition de faire un point complet sur cet aspect. Il paraît cependant important de mentionner qu'en complément des observations terrestres, les travaux récents (conduits pour partie au sein du GDR phénologie) basés sur des séries d'images temporelles et d'indices de végétation apportent des informations très pertinentes sur la dynamique saisonnière de la végétation. Si la reconstitution de séries temporelles anciennes restera limitée par la disponibilité des données anciennes, la télédétection devrait être un outil précieux pour le suivi phénologique à l'avenir.

##### Impact du changement climatique sur la phénologie de la faune

Les études de l'impact du changement climatique sur la phénologie de la faune sont récentes. Un article récent met en avant que le débourrement plus précoce de la végétation a un impact négatif sur la démographie des populations de chevreuil. Cet animal possède un haut niveau d'allocation pour sa reproduction, nécessitant une haute qualité de la végétation, et cette qualité serait moindre avec des printemps plus précoces (Gaillard *et al.*, 2013). Il y a également de fortes suspicions d'un impact du changement climatique sur les populations de grand tétras. L'impact concernerait l'avancement des dates d'accouplement au cours des 40 dernières années (ONCFS, 2012).

La base de données du GDR comprend quelques données (anciennes et contemporaines) de phénologie sur les oiseaux. Au printemps 2014, les amphibiens et les reptiles seront observés dans l'Observatoire Des Saisons. Seules des données de présence renseignent ces espèces, mais il serait

---

<sup>27</sup> <http://ciam.inra.fr/biosp/>



envisageable pour certaines espèces d'extraire une information phénologique (comm. pers. Isabelle Chuine).

### 4.3. Indicateurs de productivité et de santé des forêts

Composition du groupe de travail :

- ❖ Manuel Nicolas, ONF, Département R&D, Fontainebleau (personne relais)
- ❖ Fabien Carouille, DSF, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Paris
- ❖ Jean-Christophe Hervé, IGN, Nancy

Parmi les questions formulées, on peut distinguer celles à partir desquelles on peut espérer décliner directement des indicateurs de changement climatique en forêt :

- *Comment évolue la productivité des essences forestières sous l'effet du changement climatique ?*
- *Comment évolue la santé des écosystèmes forestiers sous l'effet du changement climatique ?*

Et celles qui relèvent davantage de la recherche et de l'évaluation des indicateurs potentiels :

- *Comment évolue la sensibilité des variables de santé et de productivité des forêts aux paramètres climatiques ?*
- *Comment évolue l'épidémiologie des ravageurs biotiques des forêts face au changement climatique ?*

Enfin une question qui intéresse différents publics, en lien avec les services écosystémiques :

- *Comment évolue le stockage de carbone dans la biomasse aérienne et dans les sols ?*

#### INDICATEURS POTENTIELS EVALUES

- ✓ DEFICIT FOLIAIRE
- ✓ MORTALITE DE BRANCHES DANS LE HOUPPIER FONCTIONNEL
- ✓ CROISSANCE RADIALE
- ✓ MORTALITE DES ARBRES
- ✓ STOCK DE CARBONE DES SOLS

Ces indicateurs potentiels sont analysés ci-après. D'autres pistes sont ensuite plus rapidement commentées.

#### 4.3.1. Déficit foliaire

##### DONNEES

Bien renseigné depuis 1989 sur le réseau systématique de suivi des dommages forestiers (16 x 16 km) et depuis 1994 sur le réseau RENECOFOR, il permet de décrire un état de santé général des arbres. C'est un des rares protocoles applicable à toutes les essences et suivi de manière extensive en Europe. La qualité des données recueillies repose sur la mise en œuvre annuelle de formations des opérateurs, d'exercices d'intercalibration et de relevés de contrôle par une seconde équipe de notateurs sur un minimum de 5 % des sites. Si le protocole d'observation est resté comparable

depuis 1989, des réserves sont à mentionner sur les premières années de mise en œuvre du fait d'un ajustement de la sévérité de notation entre 1994 et 1997 (Landmann *et al.*, 1999).

### INTERETS DE L'INDICATEUR

Depuis 1997, les évolutions des déficits foliaires du réseau 16 x 16 km montrent une tendance globale à la hausse pour l'ensemble des résineux (évolution régulière) et l'ensemble des feuillus (de façon plus irrégulière), d'après Goudet (2013). Cette évolution globale est difficile à interpréter car elle n'est pas connectée à des observations locales suffisamment documentées de dégradation de l'état sanitaire et elle couvre une grande hétérogénéité en fonction des essences et des régions. La région méditerranéenne se distingue par les déficits foliaires les plus élevés quelle que soit l'essence. Cette évolution se retrouve à l'échelle de l'Europe du Sud sur le réseau ICP-Forests (Lorenz et Becher, 2012) et, concernant la péninsule ibérique, une publication récente identifie le déficit hydrique comme le principal facteur causal (Carnicer *et al.*, 2011). Cette thématique s'inscrit donc dans un contexte européen et fait l'objet d'une bibliographie scientifique significative.

### LIMITES ET PERSPECTIVES

Le déficit foliaire est un indicateur d'état sanitaire général intégrant l'effet de nombreux facteurs environnementaux subis par les arbres. Ses variations nécessitent d'être analysées de manière approfondie.

On peut rappeler que l'intervention du déficit hydrique dans l'évolution du déficit foliaire a été documentée sur de courtes périodes dès les années 1990 (Bréda et Landmann, 1995 ; Badeau *et al.* 1997 ; Badeau, 1999). Les séries temporelles plus longues et les données de meilleure qualité offrent aujourd'hui des perspectives plus riches. Ainsi, les études récentes menées sur le réseau RENECOFOR (Ferretti *et al.*, 2013 ; Ferretti *et al.*, 2014) ont permis :

- de mettre en évidence des variations interannuelles et tendances significatives sur 15 ans au-delà des incertitudes liées aux observateurs ;
- de hiérarchiser les divers facteurs explicatifs dans les variations temporelles du déficit foliaire, confirmant la prépondérance des paramètres d'alimentation hydrique y compris des années antérieures tout en indiquant un effet notable de l'évolution de la densité du peuplement et, sur certains sites, des symptômes pathologiques ;
- d'établir une relation significative entre déficits foliaires et croissance dès les faibles niveaux de déficits foliaires et sans effet de seuil évident.

Le vieillissement des arbres-échantillons est une limite potentielle pour ce type d'analyse dans le réseau RENECOFOR (constitué de peuplements d'âge « jeune adulte » au démarrage). Cependant, l'âge moyen des peuplements n'est pas un facteur explicatif significatif des tendances observées sur les sites RENECOFOR (Ferretti *et al.*, 2014).

**En conclusion**, il s'agit d'évaluer si le déficit foliaire – déjà intégré aux IGD forêt – comme indicateur de « santé » (sans lien explicite avec le changement climatique) peut générer un indicateur de santé lié au changement de climat. Pour ce faire, une analyse conjointe des données du réseau 16 x 16 km et de RENECOFOR serait sans doute la voie la plus efficace, de façon à associer la représentativité spatiale du premier aux possibilités d'exploration des relations de causes à effets offertes par le second. *In fine*, en associant les résultats des deux réseaux, il s'agirait de déterminer un format d'indicateur pertinent étayant à la fois les tendances temporelles et les relations avec les variables climatiques et permettant une mise à jour régulière.

Une voie complémentaire serait de donner la priorité à l'étude de la **croissance radiale** sur le dispositif 16 x 16 km<sup>28</sup>. Cette approche aurait notamment l'intérêt d'apporter des éléments nouveaux à la discussion contradictoire (qui a cours depuis 25 ans) sur les valeurs intrinsèques des indicateurs de « vitalité » des arbres.

### 4.3.2. Mortalité de branches

#### DONNEES

Développé par le DSF et étendu à l'inventaire forestier, la mortalité de branches dans le houppier fonctionnel<sup>29</sup> est suivie depuis fin 2005. Actuellement, elle est suivie dans trois réseaux : l'inventaire forestier (IGN), le réseau de suivi des dommages forestiers (16 x 16 km) et le réseau RENECOFOR. Les notations sont donc récentes et le protocole a mis un certain temps à se stabiliser.

#### INTERETS DE L'INDICATEUR

Cet indicateur est apprécié visuellement, donc peu coûteux. Il donne une appréciation qui se veut plus pertinente de l'état sanitaire que le déficit foliaire. Son appréciation est possible (quoique pas forcément aisée) à l'état defeuillé.

#### LIMITES ET PERSPECTIVES

Outre le faible recul historique, des limites méthodologiques subsistent :

- les fines branches mortes tombent assez rapidement (avec le vent). Des arbres très dépérissants (forte perte de ramifications par rapport à un état estimé normal) peuvent être notés avec peu de branches mortes ;
- sa valeur indicatrice de la santé de l'arbre n'est sans doute pas tout à fait homogène entre feuillus et résineux, entre descente de cime et mortalité à l'intérieur du houppier, et entre une mortalité en cours et une mortalité passée.

Il faudrait adjoindre à cet indicateur une appréciation de perte de ramification qui se réfère à un état normal de l'arbre (proche, dans son concept, à l'arbre de référence du déficit foliaire mais moins « exigeant »). La combinaison des deux indicateurs (mortalité de branches et perte de ramification) permettrait de donner une note synthétique de dépérissement.

Les données de mortalité de branches ont fait l'objet d'analyses dans le cadre du suivi des dépérissements (Rodrigues, 2009 ; Thauvin, 2011) et d'autres travaux sont en cours sur son évolution spatio-temporelle en lien avec le changement climatique<sup>30</sup>. Il est sans doute intéressant de traiter conjointement ces données avec celles de mortalité des tiges tout en prenant en compte la gestion des peuplements.

Ce travail d'analyse est un préalable à la définition éventuelle d'un indicateur de santé des arbres et de ses liens avec le changement climatique.

### 4.3.3. Croissance radiale

#### DONNEES

---

<sup>28</sup> Projet en cours d'élaboration associant le DSF et l'INRA

<sup>29</sup> Seule la moitié supérieure du houppier, ou houppier fonctionnel, est retenue pour éviter de comptabiliser les branches mortes à la suite d'un déficit d'accès à la lumière, phénomène naturel n'indiquant pas une situation de crise pour l'arbre.

<sup>30</sup> Thèse débutée fin 2013 au LERFoB – AgroParisTech, sous la conduite de Christian Piedallu (financement ONF)

L'IGN possède 50 ans de données sur la croissance radiale qui correspond à la lecture des cinq derniers cernes. Depuis 2005, l'IGN a mis en place une nouvelle méthode. La croissance est observée partout en France chaque année, ce qui offre la possibilité d'avoir un suivi annualisé de la croissance.

Les données sont :

- la largeur cumulée des cinq derniers cernes avant le passage en inventaire (IR5). La première campagne avec la nouvelle méthode est 2005 (période IR5 : 2000-2004).
- depuis la campagne de 2007 : mesure des largeurs de chacun des cinq derniers cernes (IR1, IR2, IR3, IR4, IR5) sur deux arbres dominants par placette. Depuis 2008, tous les arbres de la campagne de 2007 sont suivis.

### **INTERETS DE L'INDICATEUR**

La mesure de la croissance est objective et de précision connue. L'information contenue dans un cerne est un signal complexe, intégrant les caractéristiques intrinsèques de l'arbre (effet de l'âge d'élaboration du cerne) et ses conditions environnementales de croissance (composante climatique et perturbations locales et régionales influençant le peuplement).

### **LIMITES ET PERSPECTIVES**

Ces données font l'objet de la mise en place d'un nouvel axe de recherche<sup>31</sup> qui vise à établir des indicateurs d'impact du changement climatique (croissance et mortalité) à partir des données de l'inventaire forestier<sup>32</sup>. Pour cela, il faut discerner l'effet du climat dans la croissance radiale.

Ce projet consiste en trois phases :

1. évaluer la fiabilité de la mesure des largeurs de cerne individuelle, et notamment, évaluation d'un éventuel effet « position » (chaque année de croissance étant mesurée cinq fois, sur cinq échantillons différents et en cinq positions différentes) ;
2. caractériser la réaction des espèces par région aux variations climatiques du début des années 2000 sur la base des accroissements annuels si possible, à défaut sur la base IR5. Etablir par espèce et par région des valeurs de référence pour l'accroissement radial. Identifier les effets des facteurs non climatiques (âge, diamètre des arbres, sylviculture, station, accru/ancienne forêt, etc.) ;
3. proposer un indicateur annualisé de croissance radiale permettant de surveiller les évolutions de celle-ci « toutes choses égales par ailleurs ».

#### **4.3.4. Mortalité des arbres**

La mortalité des arbres est suivie dans les réseaux sanitaires (Réseau de suivi des dommages forestiers 16 x 16 km, RENECOFOR) et par l'IGN. Généralement dispersée, potentiellement causée par des facteurs variés, fortement influencée par la gestion forestière, elle n'est pas aisée à appréhender. Seul le cas des données de l'IGN est ici présenté.

### **DONNEES**

---

<sup>31</sup> dans le cadre d'un nouveau laboratoire IGN consacré aux questions forestières

<sup>32</sup> Pierre Mérian est le chercheur nouvellement en charge de ce thème.

Cet indicateur concerne aussi le suivi des chablis non exceptionnels. Les données issues de l'IGN sont disponibles depuis presque 50 ans et peuvent être utilisées aujourd'hui pour construire un indicateur<sup>33</sup>. Les données peuvent permettre d'extraire la mortalité globale ou encore le nombre de chablis non exceptionnels ou les arbres morts sur pied.

### **INTERETS DE L'INDICATEUR**

Cette donnée semble importante pour le suivi sur le long terme des dépérissements. Sur la période de 2005 à 2009, la mortalité a été estimée en France à 8 millions de m<sup>3</sup> par an soit 10 % de la production biologique, ce qui équivaut à un taux de mortalité annuel de 0,3 % (Asse, 2012 ; Colin *et al.*, 2011).

### **LES LIMITES ET PERSPECTIVES**

Ces données sont mesurées sur des placettes temporaires ce qui peut constituer une limite : en l'absence de retour sur les mêmes placettes, le diagnostic des phénomènes de mortalité, souvent diffus, complexes et difficiles à appréhender, est moins bon du fait de la variabilité spatiale. A partir de 2015, les équipes de l'Inventaire repasseront sur les placettes (inventoriées 5 ans auparavant). Ce changement de protocole engendrera des problèmes de continuité de la série de données mais a contrario pourrait permettre d'avoir des séries à long terme nécessaires à la compréhension de la mortalité.

## **4.3.5. Stock de carbone des sols**

### **DONNEES**

Les données correspondent à la concentration en carbone organique des sols (de 0 à 40 cm pour le réseau RENECOFOR) et des litières.

Deux campagnes ont été réalisées à 15 ans d'intervalle sur le réseau RENECOFOR suivant un protocole rigoureusement comparable (Ponette *et al.*, 1997 ; Jonard *et al.*, 2013). Les données issues du réseau RMQS (dispositif de suivi sur le maillage 16 km x 16 km) ne concernent pour le moment qu'une seule campagne (Gis Sol, 2011 ; Badeau *et al.*, 2009), la première campagne (1993-1994) (Badeau, 1998) ayant été conçue pour donner une photographie plus que dans l'optique d'une répétition.

### **INTERETS DE L'INDICATEUR**

Cet indicateur semble suffisamment précis, dans les conditions actuelles d'évolution du carbone des sols, pour détecter des évolutions ; c'est ainsi que sur le réseau RENECOFOR, une augmentation significative des stocks de carbone des sols forestiers a été documentée (Jonard *et al.*, 2013).

Ces mesures pourraient donc permettre de suivre si les sols forestiers jouent un rôle de puits ou de source de carbone. L'indicateur de bilan des entrées et des sorties de carbone correspond à la production primaire nette (photosynthèse – respiration autotrophe) à laquelle on retire la respiration liée à l'activité biologique des sols. Cet indicateur intégrerait des notions d'impact et d'atténuation potentielle du changement climatique (Schmidt *et al.*, 2011).

Cette donnée est suivie au niveau européen dans le cadre du programme ICP Forests. Les mesures ont été harmonisées sur le niveau 16 km x 16 km en 2007-2008 (inventaire Biosoil). Quelques pays

---

<sup>33</sup> Ces données font l'objet, avec les autres paramètres évoqués en 4.3.3, d'un nouvel axe de recherche à l'IGN.

disposent déjà de répétitions de mesures comparables dans le temps (Allemagne, Belgique, De Vos & Cools, 2011).

## LES LIMITES ET PERSPECTIVES

Ces données font déjà partie des IGD des forêts, mais uniquement pour le suivi de l'évolution de la fertilité des sols, sans lien explicite avec le changement climatique. Les deux campagnes de mesures rigoureusement comparables sur le réseau RENECOFOR peuvent permettre de construire un indicateur d'évolution. Il y a cependant des contraintes à discuter, notamment l'intervalle de temps élevé entre les campagnes (15 ans minimum), ou encore le fait que l'indicateur n'est pas univoque ; on peut penser que la réaction au climat est d'abord positive (accumulation de carbone) puis négative (relargage) ultérieurement.

### 4.3.6. Autres pistes

#### Dégâts liés aux températures froides

Les températures hivernales ont augmenté sensiblement au cours des décennies récentes<sup>34</sup> et cette tendance devrait s'accroître à l'avenir. Dès lors, pourquoi s'intéresser ici aux risques liés aux températures basses ? Il semble d'une part que les interactions futures entre périodes chaudes précédentes des gels printaniers restent incertaines et, d'autre part, que la capacité de résistance au gel s'acquiert à la chute des feuilles sous l'influence des basses températures<sup>35</sup>, ce qui pourrait paradoxalement conduire à une vulnérabilité accrue des arbres aux gels hivernaux.

Les discussions menées dans le cadre de SICFOR n'ont pas permis de faire émerger des propositions précises d'indicateurs mais un résumé des discussions est néanmoins proposé ici.

Considérant l'impact du gel sur les espèces végétales, il serait également pertinent d'étudier d'autres variables comme la date du premier jour de gel ou celle du dernier jour de gel. En termes de faisabilité, ces données pourraient a priori être facilement obtenues par Météo-France.

Les difficultés sont de deux types :

- divers dysfonctionnements des arbres forestiers sont imputés aux températures froides mais les mécanismes d'action en cause sont mal connus, ce qui s'explique par leur complexité et le relativement faible effort de recherche dans ce domaine ;
- si l'on s'intéresse aux effets du gel comme contrainte pour des pathogènes ou des parasites, il faudrait disposer de données sur la durée et l'intensité du gel, données qui sont pas actuellement. L'homogénéisation des séries de données n'est faite qu'à l'échelle mensuelle car l'homogénéisation des données quotidiennes pour des séries longues est encore au stade de recherche.

#### ***Les dégâts de gel printaniers causés par des gels tardifs***

Il s'agit des dégâts les plus communs et relativement les mieux connus, qui font l'objet, lorsqu'ils sont importants comme en 1997, de signalements précis et dont on voit la trace sur plusieurs essences et une bonne partie du territoire grâce aux réseaux de suivi (Fleisch, 1998). Les dégâts observés au cours des années récentes en forêt méditerranéenne touchent divers organes – fleurs, feuilles ou

---

<sup>34</sup> cf. diminution du « nombre de jours de gel » indicateur climatique proposé par l'ONERC : <http://onerc.developpement-durable.gouv.fr/fr/indicateur/nombre-de-jours-de-gel>

<sup>35</sup> projet ANR ACOUFREEZE (début : mars 2012, coordination : Thierry Ameglio, Inra Clermont-Ferrand).  
[http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx\\_lwmsuivibilan\\_pi2\[CODE\]=ANR-11-ISV7-0003](http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-11-ISV7-0003)

aiguilles, tronc – et varient fortement dans l'espace (Vennetier *et al.*, 2011 et <sup>36</sup>) et le temps ; ils peuvent être visibles immédiatement ou avec un certain décalage. Une étude américaine récente met en évidence l'interaction entre périodes chaudes précédentes des gels printaniers et les dégâts de gel, qui apparaissent en augmentation (Augsburger, 2013).

Le risque de dégâts pourrait être approché par un indicateur prenant en compte la date de débourrement et l'occurrence de gelées en-dessous d'un certain seuil.

### ***Chutes brutales de température à l'automne***

Un exemple récent concerne le hêtre dans les Ardennes. Suite à l'arrivée brutale du gel en novembre 1998 (Reuter *et al.*, 2005 ; Huart *et al.*, 2003 ), des dégâts importants sont apparus l'année suivante, qui se prolongent jusqu'à ce jour avec le développement de champignons lignivores apparus sur les troncs peu après l'événement.

Un indicateur de ce type de risque devrait décrire la cinétique des températures en automne (températures douces suivies brutalement de températures négatives). Aucune étude même exploratoire n'est disponible pour les arbres forestiers, mais quelques références sont disponibles dans le domaine de la production fruitière. Des travaux de l'INRA<sup>37</sup> permettent de proposer un modèle de prédiction de la résistance (Charrier *et al.*, 2013) et devraient déboucher dans un avenir proche sur un modèle reliant données climatiques et caractéristiques physiologiques pertinentes.

### ***Phénomènes de froid au cœur de l'hiver***

Les froids intenses hivernaux sont rarement très dommageables dans la mesure où les essences sont acclimatées. Le froid intense peut intervenir en plein hiver après une période douce, situation qui se rapproche des chutes de températures automnales. Ainsi, le gel de 1956 (février très froid après une période très douce) a occasionné des dommages importants sur les forêts françaises. En 1985-1986 la succession gel en décembre, dégel en janvier puis gel brutal en février offre une séquence contrastée de température qui a fait des dégâts, mais ces deux événements sont aussi couplés avec des minima très bas de température (comm. pers. L.-M. Nageleisen).

### ***Rougissemments des résineux en sortie d'hiver***

Le cas des rougissemments physiologiques en sortie d'hiver, particulièrement spectaculaires sur douglas (Goudet, 2009), semble lié à une cinétique journalière : gel la nuit et températures positives dans la journée. Une étude bibliographique<sup>38</sup> en cours doit permettre de progresser dans la compréhension de ces phénomènes

### ***Effets indirects du gel sur les pathogènes et les insectes ravageurs***

Le gel constitue une contrainte pour les arbres mais aussi pour des pathogènes ou parasites. On peut citer l'exemple remarquable de la pullulation de scolytes nord-américaine qui s'explique en grande partie par le fait qu'en raison de l'évolution du climat, les seuils thermiques de régulation des scolytes en hiver ne sont plus atteints au nord d'une certaine latitude. En France, la survie hivernale de certains pathogènes (*cf* Marçais & Desprez-Loustau, 2012 pour le cas l'oidium) est conditionnée à des températures moyennes hivernales qui sont au dessus d'un certain seuil. La définition d'indicateurs de ces effets est difficile car chaque bioagresseur répond à son propre seuil et il faut connaître le rôle de la température sur les espèces. Ainsi, si l'existence d'un seuil thermique qui explique la répartition spatiale de la chenille processionnaire du pin est connue de longue date, ce

---

<sup>36</sup> cf : présentation de Michel Vennetier à la réunion finale du projet SICFOR) [http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/liens\\_article/Vennetier\\_RF\\_sicfor.pdf](http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/liens_article/Vennetier_RF_sicfor.pdf)

<sup>37</sup> UMR 0547 PIAF Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre Fruitier et Forestier, Clermont-Ferrand)

<sup>38</sup> étude commandée par le DSF à l'Inra-EEF.

n'est que récemment que l'existence de plusieurs seuils de survie a été démontré : un seuil nocturne de survie des chenilles dans le nid et un seuil diurne pour l'alimentation (Robinet *et al.*, 2007).

L'idée d'établir un indicateur concernant les attaques d'insectes a été provisoirement écartée dans le renseignement des fiches, au vu de la difficulté d'avoir des données globales quantifiées au cours du temps. Il est proposé de concentrer les réflexions sur des espèces particulières comme ce qui a été proposé dans le groupe de travail « répartition des organismes » (partie 4.4.).

#### 4.4. Indicateurs de répartition des organismes

Composition du groupe de travail :

- ❖ Julie Pargade, CRPF, Amiens (personne relais)
- ❖ Frédéric Archaux, Irstea, Nogent-sur-vernisson
- ❖ Mathieu Laparie, URZF, Orléans
- ❖ Jonathan Lenoir, UPJV, Amiens
- ❖ Benoît Marçais, UMR IAM, Nancy
- ❖ Serge Morand, UMR ISE-M, Montpellier
- ❖ Dominique Piou, DSF, Bordeaux
- ❖ Alain Roques, URZF, Orléans

Emmanuel Rouyer, CRPF, Toulouse Parmi les questions formulées, on peut distinguer celles à partir desquelles on peut espérer décliner directement des indicateurs de changement climatique en forêt *Quelles sont les évolutions de la répartition des organismes (flore et faune) forestiers sous l'effet du changement climatique ?*

- *Comment évolue la composition en espèces (composante de la biodiversité) sous l'effet du changement climatique ?*
- *Comment évoluent les maladies humaines dues aux parasites forestiers (nombre de maladies, nombre de cas) ?*
- *Comment évolue la taille des aires de répartition des espèces invasives favorisées par le changement climatique ?*

D'autres questions relèvent plus d'une problématique de recherche, en amont d'un travail de recherche sur des indicateurs potentiels. Elles portent notamment sur la répartition des espèces selon le climat et la dispersion et la fragmentation des habitats :

- *Quelle est l'influence respective et combinée des températures et des précipitations sur la distribution de la faune et de la flore forestière ?*
- *Quelle est l'influence des paramètres microclimatiques locaux sur la distribution des espèces ?*
- *Quelles sont les caractéristiques écologiques des espèces (flore) qui se déplacent sous l'effet du changement climatique ?*
- *Quel est le retard des changements de répartition des organismes (flore et faune) par rapport à un déplacement théorique sans frein de dispersion (capacité de dispersion, fragmentation des habitats) et sans plasticité d'adaptation au changement climatique ? Cette réponse est-elle le signe d'un déclin des espèces ou indique-t-elle seulement que certaines espèces répondent faiblement au signal climatique ?*
- *La connectivité des espaces forestiers favorise-t-elle le déplacement et la distance de dispersion de la faune et de la flore en réponse au changement climatique ?*



## **INDICATEURS POTENTIELS EVALUES**

- ✓ **OPTIMUM ALTITUDINAL DE PRESENCE DES ESPECES**
- ✓ **REPARTITION DES ESPECES THERMOPHILES**
- ✓ **REPARTITION DES ESPECES CONTINENTALES ET ATLANTIQUES**
- ✓ **DECALAGE ENTRE DEPLACEMENT REEL ET ATTENDU DES ESPECES - DETTE CLIMATIQUE**
- ✓ **PRESENCE DE L'ENCRE A *PHYTOPHTHORA CINNAMOMI* SUR CHENE**
- ✓ **PRESENCE DE *DOTHISTROMA PINI* SUR PIN LARICIO**

Ces indicateurs potentiels sont analysés ci-après. S'y ajoute un indicateur déjà renseigné dans le jeu d'indicateurs de l'ONERC :

- ✓ **EXPANSION DU FRONT DE LA CHENILLE PROCESSIONNAIRE DU PIN**

### **4.4.1. Indicateurs de répartition des espèces**

Trois indicateurs potentiels ont été proposés pour traduire le suivi des aires de répartition des espèces : l'optimum altitudinal de présence des espèces, la répartition des espèces thermophiles, la répartition des espèces continentales et atlantiques. Les détails plus spécifiques de chaque indicateur sont renseignés en annexe 2. Les réflexions menées et les perspectives à donner autour de cette thématique sont résumées ci-dessous.

## **DONNEES**

Pour mettre en place des indicateurs de déplacement altitudinal, latitudinal et longitudinal de l'aire de répartition des espèces (flore vasculaire), plusieurs bases de données sont disponibles : les relevés floristiques de l'IGN, ECOPLANT (Gégout *et al.*, 2005), SOPHY (Brisse *et al.*, 1995) et RENECOFOR, les bases INPN et STOC-EPS gérées par le MNHN. Pour la construction de ce type d'indicateur, une réflexion sur le choix d'espèces particulièrement intéressantes à suivre, en raison de leur écologie, est nécessaire.

## **INTERETS DE CES INDICATEURS**

Les changements de répartition des organismes (végétaux et animaux) correspondent à l'une des manifestations les plus emblématiques du changement climatique. La manière dont la recomposition des espèces se fera reste incertaine, et il serait important de disposer d'indicateurs pouvant être suivis sur le long terme. Des travaux sont disponibles sur les changements passés et actuels et des simulations ont été réalisées. Le « retard » de certains animaux (oiseaux, papillons) à « suivre l'évolution du climat, (Devictor *et al.*, 2008, 2012) est établi, et de nombreuses simulations sont réalisées. Ainsi les espèces végétales méditerranéennes pourraient occuper toute la moitié sud du territoire national, tandis que le groupe des espèces tempérées-océaniques pourrait venir remplacer la végétation tempérée-continentale (Badeau *et al.*, 2010 ; Cheaib *et al.*, 2012). Ces changements semblent souvent attribuables à la hausse des températures hivernales

## **LIMITES ET PERSPECTIVES**

La construction d'un indicateur du type « position de la limite Nord ou Sud ou encore position de la latitude moyenne de présence d'un certain groupe d'espèces (thermophiles par exemple) »,

nécessite un travail approfondi<sup>39</sup> et des résultats fiables ne sont pas immédiatement disponibles. Un système de référence devra être fixé. Il est bien sûr plus compliqué de travailler sur un groupe d'espèces comme les thermophiles que de suivre la répartition d'espèces particulières (cf. travaux sur le houx ou le lierre, Dupouey & Bodin, 2007). Il semble également très pertinent de suivre les régressions des aires de répartition au Sud, plus encore que les progressions au Nord. La rétraction au Sud pour certaines espèces fait appel à des notions de survie (mortalité, capacité d'adaptation), tandis que la position de la limite Nord est en partie liée à des capacités de dispersion.

Les mérites et limites des différentes sources de données disponibles n'ont pu être que très partiellement analysés, et il n'a pas été possible de dégager une piste préférentielle. Il importe que ce travail soit poursuivi.

#### 4.4.2. Décalage entre déplacement réel et attendu de la flore et la faune

##### DONNEES

Cet indicateur potentiel a pour objectif de définir si la flore et la faune parviennent à adapter leur aire de distribution aussi rapidement qu'évoluent les paramètres climatiques. Pour le moment un indicateur potentiel concerne l'**avifaune** (Devictor *et al.*, 2008, 2012). Les données sont issues des programmes STOC-EPS (Suivi Temporel des Oiseaux Communs – Échantillonnage Ponctuel Simple) et de Météo France. Elles sont disponibles depuis 1989 mais en plus grand nombre depuis les années 2000.

##### INTERETS DE L'INDICATEUR

Ce retard de déplacement de la faune ou de la flore vis-à-vis du changement climatique correspond à ce qu'on désigne par « dette climatique » (Devictor *et al.*, 2012) et démontre que seule une partie des espèces affectées par la hausse des températures a les capacités de dispersion suffisantes pour retrouver leurs conditions optimales.

##### LIMITES ET PERSPECTIVES

L'indicateur actuel devrait être amélioré pour les massifs montagneux (évaluation de l'indicateur par massif).

Si l'indicateur concerne actuellement uniquement l'avifaune, il pourrait être étendu sur les mêmes principes à la flore vasculaire. La dette climatique serait plus importante pour les espèces de plaine que pour les espèces de montagne (contraintes de migration et gestion forestière contrastées, d'après Bertrand *et al.*, 2011). Les remarques citées en partie 4.4.1. sont également à prendre en compte pour ces données de flore vasculaire.

A court terme, il pourrait être envisagé d'adapter l'indicateur de dette climatique pour les oiseaux forestiers en sélectionnant les points forêt. Une autre méthode pourrait être de sélectionner les espèces spécialistes d'oiseaux des milieux forestiers et de comparer les résultats avec les autres groupes de spécialistes (agricoles et urbains).

#### 4.4.3. Présence de l'encre à *Phytophthora cinnamomi* sur chêne

##### DONNEES

---

<sup>39</sup> une thèse est en cours sur le sujet au Lerfob (AgroParisTech)

Les données sont issues des observations du DSF sur le réseau systématique 16 x 16 km et des observations non systématiques faites par les correspondants observateurs suites à un signalement par un propriétaire ou un gestionnaire forestier.

### **INTERETS DE L'INDICATEUR**

*Phytophthora cinnamomi* – l'encre du châtaignier – est un oomycète qui provoque des nécroses racinaires et des chancres sur troncs. Il est à l'origine de l'encre (écoulement noirâtre) qui touche le chêne et le châtaignier, deux espèces importantes de la forêt française.

Plusieurs études ont montrées que le pathogène a une meilleure survie avec les hivers doux (Benson, 1982 ; Marçais *et al.*, 1996 ; Marçais *et al.*, 2004). Il semble donc intéressant de vérifier si l'encre du chêne s'observe plus au Nord que dans le passé.

### **LIMITES ET PERSPECTIVES**

Une première limite est que la présence du champignon ne se traduit pas forcément par l'expression de la maladie. L'absence de symptômes apparents sur les placettes du réseau 16 km x 16 km ne peut pas être interprétée comme l'absence de *Phytophthora cinnamomi*.

En outre, dans la mesure où l'aire de présence est plus étendue que l'aire où les dégâts sont significatifs, il faudrait assurer une formation des observateurs pour détecter le pathogène et confirmer la présence de l'espèce par reconnaissance taxonomique en laboratoire, cette dernière étant actuellement difficile et coûteuse.

#### **4.4.4. Présence de *Dothistroma pini* sur pin laricio**

### **DONNEES**

La distribution des données est liée aux placettes de pin laricio du réseau de suivi de la processionnaire du pin du DSF, complétée par des sites complémentaires dans les régions où le pin laricio est absent.

### **INTERETS DE L'INDICATEUR**

La maladie des bandes rouges est une maladie foliaire touchant le pin à l'échelle mondiale. En France, cette maladie touche principalement les pins laricio. Elle a émergé dans les années 1990. *Dothistroma pini* et *Dothistroma septosporum* sont les deux agents pathogènes à l'origine de la maladie.

Des études ont montré que les étés chauds et humides favorisent la multiplication de la maladie (Woods *et al.*, 2005 ; Fabre *et al.*, 2012).

### **LIMITES ET PERSPECTIVES**

Les deux agents pathogènes sont très difficiles à distinguer morphologiquement et difficiles à isoler. L'identification de l'espèce *Dothistroma pini* n'a été effectuée que lors d'une campagne menée par le DSF en 2009. A la suite de ce travail, il a été montré que les niveaux de dommages sont indépendants de l'espèce et que la distribution des deux espèces cryptiques résulte des contraintes climatiques (Fabre *et al.*, 2012). Depuis cette campagne, l'identification de l'espèce n'est pas réalisée en routine lors de signalements de la maladie.

Pour renseigner cet indicateur, il faudrait réaliser périodiquement une prospection avec une identification mycologique sur l'ensemble du territoire, c'est-à-dire mettre en place et financer un dispositif national spécifique.

#### 4.4.5. Expansion du front de la chenille processionnaire du pin

Cet indicateur est déjà intégré au jeu d'indicateurs de l'ONERC.

##### DONNEES

Les données sont issues de la base de données Inra Zoologie Forestière Orléans. Des relevés de présence et absence sont réalisés tous les cinq ans en suivant toutes les routes carrossables sur une grille 8 x 8 km sur l'ensemble de la France. Des relevés exhaustifs des nids de front sont faits tous les deux ans dans la région parisienne et le Briançonnais.

##### INTERETS DE L'INDICATEUR

La chenille processionnaire du pin est le principal ravageur des pinèdes et présente une menace sanitaire pour l'homme et les animaux (urtication). Il est nécessaire de préciser la vitesse actuelle de progression de l'insecte afin de pouvoir modéliser son expansion future.

##### LIMITES ET PERSPECTIVES

Ce ravageur fait partie des organismes qui, dans un premier temps, ont suivi le réchauffement, avant de montrer un certain retard sur l'évolution du climat (*cf.* dette climatique : 4.4.2) Jusqu'aux années 1990, les barrières climatiques bloquaient la migration de l'insecte. Le suivi de la progression spatiale de l'insecte constituait alors un bon indicateur de changement climatique. Cependant, depuis cette date, l'insecte progresse significativement moins vite que l'enveloppe climatique favorable.

La perspective actuelle est de transformer l'indicateur actuel en indicateur **d'évolution temporelle de l'aire potentiellement colonisable** par la processionnaire en France et en Europe sous l'influence du changement climatique (Robinet *et al.*, 2013a). L'indicateur déjà disponible sera prochainement (courant 2014) modifié en ce sens. Des besoins sont encore nécessaires concernant la collecte des données. Au niveau de la recherche scientifique, des travaux sont attendus concernant la compréhension des effets éventuellement contradictoires des événements climatiques extrêmes (Robinet *et al.*, 2013b).

#### 4.4.6. Autres pistes

##### Répartition des espèces envahissantes thermophiles

L'idée d'obtenir un indicateur sur l'incidence du changement climatique n'a pas été retenue. En effet, pour les espèces envahissantes, surtout celles récemment introduites, les changements de distribution reflètent avant tout une dynamique de remplissage de la niche écologique de l'espèce dans son nouvel espace géographique. Il est très difficile de définir la part liée au changement climatique seul puisque les changements de distribution pour ces espèces envahissantes, récemment introduites, s'opèrent même en l'absence de changement climatique et dans un contexte climatique relativement stable.

##### Répartition des maladies humaines dues aux parasites forestiers

Cette question n'a pu être discutée de façon précise. Des études corrélatives suggèrent des effets du climat sur l'intensité des épidémies. Il semble que les variabilités climatiques soient responsables de nombreuses épidémies affectant les humains (Lafferty, 2009 ; Morand *et al.*, données non publiées). Plusieurs travaux sur la maladie de Lyme confortent l'hypothèse qu'une érosion de la biodiversité augmenterait les risques d'émergences de maladies infectieuses (Swaddle & Calos, 2008). Cette thématique mérite d'être approfondie.

## 4.5. Indicateurs potentiels d'adaptation de la gestion forestière au changement climatique

Composition du groupe de travail :

- ❖ Myriam Legay, ONF Nancy (personne relais)
- ❖ Luc Mauchamp, MEDDE Paris
- ❖ Philippe Riou-Nivert, IDF Paris
- ❖ Jean-Luc Peyron, ECOFOR Paris

En l'absence de réflexion déjà structurée dans ce domaine, ce groupe de travail a mené une démarche relativement exploratoire. Les questions formulées par le groupe ont été classées selon cinq thématiques :

### Caractéristiques des peuplements

- *Comment évoluent les peuplements en termes de structure en âges ou classes de diamètre ?*
- *Comment évolue le nombre ou le pourcentage d'essences objectives méridionales ou thermophiles ?*
- *Comment évolue la densité moyenne des peuplements ?*
- *Comment évolue la répartition entre les différents objectifs de gestion forestière (production, protection, accueil du public...) ?*

### Opérations de gestion

- *Comment évolue la fréquence et de l'intensité des éclaircies ?*
- *Comment évolue les âges d'exploitabilité ou d'exploitation ?*
- *Y a-t-il une évolution du caractère (naturel ou artificiel) de la régénération ?*
- *Quelle est l'évolution du nombre de travaux de drainage ?*

### Stratégies d'adaptation au changement climatique

- *Comment évoluent les peuplements en termes de diversification en essences ?*
- *Quelle est l'évolution du nombre d'essences produites en pépinière (en nombre de plants) ?*
- *Quelle est l'évolution de la surface d'essences plantées par les coopératives, experts, agents ONF ?*

### Intentions d'adaptation au changement climatique

- *Comment évolue le nombre d'occurrences du mot changement climatique dans les plans simples de gestion, les aménagements récemment agréés (sur 10 ans), les directives régionales d'aménagement (DRA), les schémas régionaux d'aménagement (SRA) et les schémas régionaux de gestion sylvicole (SRGS) ?*
- *Comment évolue le nombre d'occurrences du mot changement climatique dans les études engagées par les organismes ou financées par les structures régionales (conseils régionaux ou généraux...) ?*
- *Comment évolue le nombre de guides de stations forestières qui prennent en compte le changement climatique ?*
- *Quelles stratégies d'adaptation des forêts visent au maintien de l'existant (renforcer la résistance), à l'évolution des forêts (renforcement de la résilience), au remplacement des*

*forêts par d'autres occupations du sol (inondation, milieux ouverts xériques, à l'installation de forêt (remontée en altitude) ?*

- *Peut-on classer les documents directeurs (ORF : orientations régionales forestières, DRA/SRA, SRGS et les aménagements selon le degré croissant de prise en compte du changement climatique : 1. rien ; 2. changement climatique évoqué de façon descriptive et générale ; 3 appréciation des impacts potentiels locaux ; 4. mesures d'adaptation proposées 5. mesures d'adaptation déjà mises en œuvre ?*
- *Les stratégies d'adaptation sont-elles cohérentes avec les observations scientifiques et les voies préconisées par l'expertise ?*

#### **Lien entre changement climatique, biodiversité, services écosystémiques et politiques publiques**

- *Les mesures d'adaptation des forêts au changement climatique sont-elles favorables à la biodiversité actuelle, et/ou future prévue ?*
- *La gestion des aires protégées avec forêt contribue-t-elle efficacement à l'adaptation des forêts au changement climatique ?*
- *Comment la gestion adaptative des forêts pour le changement climatique affecte-t-elle (positivement ou négativement) les services rendus aujourd'hui par les écosystèmes forestiers ?*
- *L'adaptation des forêts au changement climatique est-elle intégrée et cohérente avec les politiques générales ?*

#### **Place du changement climatique dans l'enseignement et le développement**

- *Quelle est la fréquence des formations organisées mentionnant le changement climatique (CRPF, Fogefor, syndicats, journées de Cetef, ONF, IDF, AgroParisTech...) et le nombre de participants ?*
- *Quelle est l'évolution du nombre de mentions du changement climatique dans les cours des enseignants forestiers (BTS, Ecoles d'ingénieur, Universités...) ?*
- *Comment évolue le nombre d'occurrences du mot changement climatique dans les publications nationales ou locales (bulletins d'info des CRPF, de Prosilva...) ?*

#### **INDICATEURS POTENTIELS EVALUES**

Il s'agit là de la première réflexion sur les indicateurs d'adaptation au changement climatique en forêt. Le travail de ce groupe est moins abouti que celui des autres groupes dans la mesure où l'évaluation des indicateurs potentiels n'a pas été aussi approfondie que pour les autres groupes. En particulier les limites des différents indicateurs potentiels n'ont pas pu être discutées en détail.

Les indicateurs sont classés en trois grandes catégories. Le groupe de travail propose un seul indicateur pour une mise en œuvre à court terme.

#### **✓ PRISE EN COMPTE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES DOCUMENTS D'AMENAGEMENT**

Cependant le groupe a sommairement évalué un large ensemble d'indicateurs potentiels, soit déjà existants à d'autres fins, soit à analyser plus avant dans un travail ultérieur.

#### **4.5.1. Indicateurs d'évolutions sylvicoles**

La sylviculture devrait évoluer à l'avenir en fonction des orientations d'adaptation au changement climatique. Ainsi, dynamiser la sylviculture afin de récolter les arbres plus tôt peut être une façon

d'anticiper les dégâts éventuels futurs. Il y a donc un impact direct sur la densité des peuplements, l'âge moyen d'exploitation etc. Il reste que la sylviculture est largement dépendante du contexte biogéographique, de facteurs économiques comme la demande en bois ou le prix du bois, et *in fine* des choix du propriétaire. En gardant en tête ces limites énoncées, plusieurs indicateurs existants ou faciles à mobiliser mériteraient d'être analysés dans le contexte du changement climatique. Il s'agit notamment de :

- **la production de plants** (statistiques Agreste), qui concernerait le suivi du nombre de plants (par essence ou bouquet d'essences) commercialisés annuellement par les pépinières ;
- **l'âge moyen des peuplements** (indicateurs IGD Forêts) ;
- **le diamètre moyen des peuplements** (indicateurs IGD Forêts) ;
- **la part de la régénération artificielle et naturelle** (indicateurs IGD Forêts) ;
- **le nombre moyen d'essences par peuplement** (indicateurs IGD Forêts).

#### 4.5.2. Indicateurs portant sur l'évolution des préconisations

##### Prise en compte du changement climatique dans les documents d'aménagement

La mise en place de cet indicateur pourrait se baser sur une typologie simple de trois classes par exemple : pas de prise en compte ; au moins un impact décrit ; au moins une mesure d'adaptation prévue. Des statistiques pourraient être réalisées sur les nouveaux documents, au fil de la production. Les documents d'aménagement concernés devraient être publics et privés (Plans Simples de Gestion). En complément, une information intéressante pourrait être tirée d'un diagnostic demandé aux rédacteurs des documents de gestion : en quoi les documents révisés prennent-ils en compte le changement climatique ?

De manière complémentaire, l'intégration de questions sur la prise en compte du changement climatique dans l'enquête statistique RESOFOP<sup>40</sup> (auprès des propriétaires privés) pourrait être envisagée, ce qui donnerait des points de repère tous les cinq ans.

Dans tous les cas, il faut souligner que ces sondages restent des déclarations d'intention, que la gestion est très dépendante du marché du bois, ou encore, que le changement climatique peut être, dans certains cas, un prétexte plus que la motivation réelle d'une évolution de gestion. D'autres indicateurs potentiels sur l'évolution des préconisations ont été suggérés :

##### Prise en compte du changement climatique dans les documents d'orientation régionaux

Les documents concernés sont les ORF (Orientation Régionale Forestière), les DRA (Directives Régionales d'Aménagement des forêts domaniales), les SRA (Schéma Régionaux des Aménagements des forêts communales), et les SRGS (Schéma Régional de Gestion Sylvicole). La mise en place de cet indicateur nécessiterait un travail rétrospectif exhaustif des documents. A noter qu'en 2010, une enquête a été réalisée auprès des CRPF, concernant la mention du changement climatique dans les SRGS (Vert *et al.*, 2013)

##### Prise en compte du changement climatique dans les guides techniques

Le suivi est difficile à mettre en place en l'absence de collection représentative de l'ensemble du territoire pour ces guides. Pour les guides de station, l'indicateur serait peu réactif (renouvellement peu fréquent).

---

<sup>40</sup>Le RESeau d'Observation économique de la Forêt Privée, mis en place par la fédération des forestiers privés de France et le CNPF, s'appuie sur un échantillon représentatif des propriétaires forestiers. Il est mis en œuvre par le Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de Vie (CREDOC).

### 4.5.3. Indicateurs sur les efforts de recherche et de formation relatifs au changement climatique

L'importance des **financements** alloués à des recherches sur l'adaptation pourrait être suivie par le biais de base de données « projets de recherche » comme Creafor<sup>41</sup>. Des évaluations occasionnelles complémentaires pourront sans doute être fournies dans le cadre d'actions de « cartographie de la recherche » mises en œuvre par exemple dans le cadre d'actions européennes<sup>42</sup>. Il ne sera cependant pas aisé d'aboutir à des indicateurs standardisés.

Il serait par ailleurs intéressant de disposer d'un référencement du **nombre de formations** et du **flux de personnes formées** sur la thématique du changement climatique. La mise en œuvre d'un tel suivi suppose cependant un travail important et le concours des organismes de formation.

---

<sup>41</sup> <http://creafor.gip-ecofor.org/>

<sup>42</sup> exemples des ERA-NETs Foresterra et Sumforest dans le domaine forestier





## 5. PRESENTATION SYNOPTIQUE DES RESULTATS DU PROJET SICFOR

A l'issue du projet SICFOR, il est intéressant de visualiser les résultats sous une forme synthétique. Nous proposons ci-après dans un premier temps de comparer les indicateurs acquis et pour lesquels des perspectives ont été formulées avec la situation des autres pays, puis de résumer comment les différentes sources de données peuvent permettre de fournir la base d'indicateurs dans les 5 thèmes du projet.

### 5.1. LES APPORTS DU PROJET SICFOR REPLACÉ DANS LE CONTEXTE INTERNATIONAL

A la lecture du **tableau 1**, il apparaît que le travail réalisé jusqu'ici par l'ONERC et par le biais d'initiatives individuelles a permis de mettre au point 4 indicateurs (Indice Feu Météo, Nombre de jours de gel, Quantité de pollen de bouleau), ce qui pourrait être « suffisant », mais couvre mal les grands thèmes (pas d'indicateur de phénologie et productivité/santé).

Les indicateurs nouveaux, disponibles à court terme (indicateur de sécheresse, indicateur de prise en compte du changement climatique dans les documents d'aménagement) sont peu nombreux, mais les indicateurs déjà disponibles, nouvellement disponibles et potentiellement disponibles couvrent les 5 thèmes et pourraient constituer à moyen terme (environ 5 ans) un jeu d'indicateurs « équilibré ». Un appui aux acteurs concernés sera toutefois indispensable sous la forme d'animation scientifique ou d'aide aux travaux d'analyse de données par exemple.

Les indicateurs disponibles à l'étranger semblent, pris dans leur ensemble, couvrir tous les thèmes mais 1/ le nombre de pays qui affichent des indicateurs et le nombre d'indicateurs est relativement faible, et 2/ on peut penser qu'une bonne partie des indicateurs cités dans les rapports étrangers n'auraient sans doute pas été retenus dans le cadre du projet SICFOR. En effet, la production et la mortalité forestières, ou les incendies des forêts (en France et à l'étranger) causées par des facteurs variés, parmi lesquels le changement du climat peut être un facteur plus ou moins important. Comme de surcroît les experts français n'ont pas disposé, dans le cadre de SICFOR, de données précises concernant les indicateurs étrangers (métriques des indicateurs, qualité des jeux de données) il est difficile d'aller plus loin dans la comparaison.

### 5.2. ARTICULATION ENTRE APPROCHES THEMATIQUES ET SOURCES DE DONNEES

On constate qu'un nombre relativement modeste de sources de données « nationales », de l'ordre d'une quinzaine, est utilisée ou pressentie pour renseigner les indicateurs. Il est probable que certaines sources aient échappé à l'attention des experts, parce qu'elles concernent des taxons non pris en compte à ce stade dans ce travail ou parce que ces bases de données concernent un territoire limité mais potentiellement intéressant (on observe que dans les pays étrangers, ce sont souvent des exemples « locaux » qui sont d'ailleurs mis en avant).

Certains réseaux de suivi et d'observation sont susceptibles de fournir des éléments dans plusieurs domaines : c'est le cas notamment de l'inventaire forestier, du réseau 16 x 16 km, ou encore de RENECOFOR. Le potentiel de ces réseaux pour répondre à des questions liées au changement climatique est loin d'être exploré, notamment parce que cette thématique nouvelle n'était pas jusqu'ici au centre de l'attention de leurs gestionnaires. Certaines thématiques, notamment celle des aires de répartition des espèces, peuvent être abordées par le biais de sources multiples, et nécessitent des analyses comparées soignées qui prennent nécessairement du temps. Enfin, certaines bases recueillent déjà l'essentiel des données d'un certain type (exemple de la base de données phénologiques du GDR ?) et mérite *a priori* une attention particulière.

**Tableau 1.** Présentation synoptique des indicateurs de changement climatique en forêt, classés selon leur disponibilité et leur rattachement thématique (en surligné gris : indicateurs nouvellement proposés à l'issu du projet SICFOR).

Indicateurs de changement climatique en forêt	Disponibles à l'étranger	Disponibles en France (jeu d'indicateurs de l'ONERC) ou disponibles à court terme à l'issu de SICFOR	Potentiellement disponibles en France à terme (selon les moyens disponibles et les difficultés rencontrées)
BIOCLIMATIQUES		<p><b>(1) Déficit hydrique des peuplements forestiers</b> Calculé avec le modèle Biljou© (INRA) et les données journalières de Météo France. Disponible en 2014</p> <p><b>(2) Indicateur de vulnérabilité aux incendies IFM</b> Indice Forêt Météo ou Feu Météo (Météo France). Intégré aux indicateurs ONERC en 2014.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Nombre de jours de gel</b> (Météo France)</li> </ul> <p>Présent dans le jeu d'indicateurs ONERC. Peu pertinent vis-à-vis des dégâts de gel en forêt.</p>	
PHENOLOGIQUES	<p><b>Dates de débourrement</b> : chèvrefeuille, lilas (USA), chêne (RU), végétation (Suède) marronnier à Genève depuis 1808 (CH)</p> <p><b>Dates de début de floraison</b> : chèvrefeuille et lilas (USA), peuplier faux-tremble, région d'Edmonton (Canada)</p> <p><b>Durée de la saison de végétation</b> (pays nordiques)</p> <p><b>Dates de début de pollinisation</b> : bouleau (Suède)</p>		<p><b>(3)-(6) Dates de feuillaison, de floraison, de maturation des fruits, et de coloration des feuilles</b></p> <p>Pas de séries à long terme validées pour les arbres forestiers.</p> <p>Perspectives intéressantes en lien avec la base de données de l'« observatoire des saisons » : reconstitution de séries à long terme, valorisation de la série temporelle "Renecofor" (avec reconstruction éventuelle plus longue du passé). Espèces végétales et, sous réserve, faune. Nécessité d'un traitement spécifique de données.</p>
PRODUCTIVITE ET DE SANTE DES FORETS	<p><b>Croissance et productivité</b> : croissance annuelle des forêts (pays nordiques) ; production annuelle de bois (Nord, AEE)</p> <p><b>Santé des arbres</b> : taux de mortalité des arbres de 1982 à 2004 (Californie) ; santé des hêtre (Grande Bretagne)</p> <p><b>Incendies de forêts</b> : surface brûlée (totale, par type de végétation) en Californie depuis 1950 ; surfaces brûlées</p>		<p><b>(7) Déficit foliaire (8) mortalité des branches (9) mortalité des arbres.</b> Séries de moyenne durée disponibles, mais problèmes méthodologiques (discontinuités, pertinence incertaine des paramètres,...)</p> <p><b>(10) croissance radiale.</b> Un travail démarre en 2014 à l'IGN (données de l'inventaire forestier national) sur la <b>croissance et la mortalité des arbres</b> .</p>

	pour 5 pays européens depuis 1980 (AEE) <b>Stock de carbone en forêt</b> : évoqué par l'AEE (2012)		Le potentiel des données de <b>dégâts causés par le gel, les incendies de forêt, les insectes ravageurs et champignons pathogènes</b> n'a été que partiellement évalué, et n'a pas débouché sur des propositions d'indicateurs. (11) L'évolution des <b>stocks de carbone</b> : suivi de manière fiable, mais lien complexe avec le changement climatique
REPARTITION DES ORGANISMES	<b>Composition de la végétation</b> : canyon profond dans les montagnes de Santa Rosa (1977-2007) (Californie) <b>Modification des aires de répartition</b> : <i>Pinus ponderosa</i> depuis 1930 (forêts de la Sierra Nevada, Californie), plantes alpines et subalpines (Californie) <b>Limite altitudinale, latitudinale des arbres</b> (Suède) <b>Densité des forêts</b> : forêts subalpines, Sierra Nevada (par type de peuplement, 1929-1934 et 2007-2009) (Californie)	<b>(18) Expansion du front de la chenille processionnaire du pin</b> , indicateur intégré depuis plusieurs années à la liste de l'ONERC.	<b>(12) Optimum altitudinal de présence des espèces</b> <b>(13) Répartition des espèces thermophiles</b> <b>(14) Répartition des espèces continentales, atlantiques</b> <b>(15) Décalage entre déplacement réel et attendu des espèces) Dette climatique)</b> Répartition des espèces végétales et animales (12-15), il n'a pas été possible dans le temps disponible de faire converger les points de vue des experts et valider les indicateurs proposés . Un effort collectif mérite d'être poursuivi  <b>(16) Présence de l'encre à <i>Phytophthora cinnamomi</i> sur chêne</b> <b>(17) Présence de <i>Dothistroma pini</i> sur Pin laricio</b> Les données sanitaires actuellement disponibles au DSF sont jugées de qualité insuffisante pour permettre de constituer des séries spatio- temporelles de qualité suffisante.
AUTRES EFFETS, DONT MALADIES HUMAINES LIÉES AU MILIEU FORESTIER		<b>Quantité de pollen de bouleau</b> : dépassement d'un certain seuil de quantité de pollen (lien avec les allergies). Indicateur adopté en 2014 par l'ONERC.	
ADAPTATION DE LA GESTION FORESTIERE		<b>Prise en compte du changement climatique dans les documents d'aménagement.</b> (sous 1 à 3 ans) pour une prise en compte dans les Indicateurs de gestion durable des forêts	Indicateurs d'adaptation au changement climatiques. Travail préliminaire : 1 indicateur proposé et de nombreuses pistes à poursuivre dans trois domaines : - <b>évolutions sylvicoles</b> - <b>évolution des préconisations</b> (documents d'orientation et d'aménagement , guides techniques) - <b>efforts de recherche et de formation</b> relatifs au changement climatique (financements, formations, formations) Les indicateurs de cette catégorie pourront s'insérer dans les Indicateurs de gestion durable des forêts.

**Tableau 2.** Correspondances entre les principales sources de données (bases de données, réseaux d'observation et de suivi) et les types d'indicateurs qu'elles sont susceptibles de fournir.

SOURCES DE DONNEES	TYPES D'INDICATEURS					
	Indice bioclimatique	Phénologie	Aire de répartition	Productivité et santé	Stockage de carbone	Adaptation
Météo France (et modèles Biljou© et IFM), ...	X					
Base de données phénologie SI-GECC, CNRS		X				
Base de données DSF (enquêtes, détections opportunistes)			X	X		
Réseau Processionnaire du pin, DSF			X			
BD Inra Zoologie Forestière Orléans INRA			X			
Atlas botaniques anciens			X			
Base floristique ECOPLANT, AgroParisTech			X			
Base floristique SOPHY, Association d'Informatique Appliquée à la Botanique			X			
INPN, MNHN			X			
STOC-EPS, MNHN			X			
Inventaire forestier national, IGN			X	X	X	X
Réseau de suivi systématique des dommages forestiers (16x16 km), DSF			(X)	X	X	X
RMQS, INRA					X	
Renecofor ONF	X	X		X	X	X



## DISCUSSION ET CONCLUSION

L'ONERC mène depuis 2005 un travail opiniâtre sur les indicateurs de changement climatique basé sur des sollicitations de scientifiques détenteurs d'informations pertinentes ou des propositions spontanées d'indicateurs par des experts, et non sur une mobilisation organisée et de grande ampleur de l'expertise scientifique. Il était dès lors intéressant de voir si une démarche coordonnée dans le domaine forestier pouvait générer le jeu d'indicateurs cohérent qui fait défaut jusque là.

### DES ACQUIS IMPORTANTS

Au terme de ce projet, il faut souligner le chemin parcouru : les champs thématiques concernés ont été décrits, une première évaluation des réseaux et dispositifs de suivi a permis de révéler un potentiel important, et d'identifier les améliorations les plus pertinentes. Ce résultat est encourageant dans la mesure où l'utilisation des données des dispositifs de suivi continu pour établir des indicateurs de changement climatique est récente.

Ces résultats doivent l'essentiel à la communauté d'experts dont la constitution est, en tant que tel, un autre résultat important. La réflexion proposée dans le cadre du projet SICFOR a rencontré un fort intérêt. Ainsi, une quarantaine d'experts de disciplines variées et issus d'une douzaine d'institutions<sup>43</sup> ont participé de manière approfondie (groupes de travail) ou de façon plus ponctuelle au travail, alors qu'en 2006, une sollicitation ponctuelle d'experts sur le même thème par le GIP Ecofor n'avait rencontré qu'un écho limité. Cette évolution favorable n'est sans doute pas sans rapport avec le fait que de nombreux chercheurs travaillent à présent sur le changement climatique et publient dans ce domaine (cf. bibliographie du rapport).

### LES RAISONS D'UN NOMBRE FAIBLE D'INDICATEURS RETENUS *IN FINE*

Au moins provisoirement, le nombre d'indicateurs disponibles à court terme est faible. Les raisons en sont variées. Nous n'en citerons ici que trois, qui sont, à l'expérience, parmi les plus importantes :

- les **séries chronologiques longues** et cohérentes sont rares et les séries moins longues sont généralement écartées : ainsi, une série temporelle de données phénologiques de 17 ans (RENECOFOR) est encore insuffisante pour mettre en évidence une tendance de la phénologie et donc l'importance éventuelle du changement climatique. Une telle série peut être présentée à titre de *descripteur* (cf. 1.3) et non d'indicateur, et de nouvelles séries basées sur des paramètres nouveaux et jugés très pertinents peuvent être démarrées ;
- l'identification du signal climatique parmi d'autres influences – la question de l'**attribution** (cf. 1.3) – est le plus souvent une tâche ardue, qui donne lieu à des discussions contradictoires entre experts. La prudence conduit alors, lors de l'examen des indicateurs-candidats, à différer l'adoption d'un tel indicateur et à la conditionner à une amélioration significative des connaissances. Une autre attitude possible, plus pragmatique mais qui heurte la majorité des experts français, est d'utiliser ces indicateurs comme recelant « une part de changement climatique » (posture apparemment fréquente à l'étranger). La productivité et la santé des forêts sont des exemples typiques de ce type de paramètres : s'il

---

<sup>43</sup> AgroParisTech, CNRS, CRPF Nord-Pas-de-Calais et Midi-Pyrénées, DSF (MAAF), ESA Purpan, IDF, IGN, INRA, IRSTEA, Météo France, ONB (MEDDE), ONF, Université d'Amiens.

est raisonnable de penser que le changement climatique est pour quelque chose dans les évolutions observées, on ignore quel est son poids ;

- la **construction d'un indicateur**, en particulier la définition de sa métrique, est rarement simple, et celle d'indicateurs composites nécessite le plus souvent des travaux approfondis. Les difficultés rencontrées pour caractériser la modification des aires de répartition des végétaux (jeu de données le plus approprié, métrique de la progression, etc.) en sont un exemple. Il faut donc accepter le fait que cette démarche demande du temps, et garder à l'esprit que l'adoption d'indicateurs insuffisamment validés risque fort de conduire à des difficultés (comment retirer un indicateur validé, faut-il le remplacer ? etc.)

#### **LA DEMARCHE DE CONSTRUCTION D'INDICATEURS : QUESTIONS DE GOUVERNANCE**

L'ONERC ou d'autres institutions peuvent souhaiter étendre ce type de démarche à d'autres milieux naturels que la forêt. Sur la base du travail réalisé dans le cadre du projet SICFOR, quelques recommandations peuvent être formulées.

Tout d'abord, de façon très pratique, il ne faut pas sous-estimer la **durée du projet** : la production d'indicateurs nécessite une collaboration effective entre des scientifiques d'horizons divers, des producteurs de données, et des utilisateurs, tous intéressés par les indicateurs, mais tous sensibles à différents aspects. La qualité du travail dépend notamment de la compréhension mutuelle qui a pu être acquise au fil des échanges.

La qualité du « **contrat** » entre **animateurs du projet et experts** est un autre élément important. En dépit de la multiplication des expertises de toutes sortes, c'est un mode d'organisation relativement informel qui est généralement mis en place. La convention entre le bailleur de fond et l'organisme en charge de l'animation ne comporte pas nécessairement des estimations précises (difficiles à faire, il est vrai) du temps d'expert qu'il faudra mobiliser ; les experts sont donc invités à contribuer sur une base incertaine, et révisée à la hausse si la matière se révèle abondante et les discussions fructueuses. Ces déviations peuvent mettre en difficulté certains experts vis-à-vis de leur hiérarchie et générer des interrogations en retour sur les enjeux de l'exercice et la priorité à accorder à ce travail, questions insuffisamment discutées au démarrage du travail. Ces aspects sont importants car la qualité du travail repose en bonne partie sur la participation d'un certain nombre d'experts référents. Faut-il passer d'une gouvernance (classiquement) très souple à une gouvernance nettement plus codifiée ? Il est difficile de dire ce qu'on y gagnerait, mais au minimum, on peut recommander d'explicitier au mieux les termes du « contrat » en début de projet.

Enfin, il faut accorder une attention particulière à la **procédure de sélection des indicateurs potentiels**. Il est fréquent, dans les exercices visant à créer un jeu d'indicateurs, de disposer de plusieurs dizaines d'indicateurs potentiels, ce qui implique que la sélection puisse être un processus long. Pour ne pas trop alourdir et retarder le travail, c'est un processus d'évaluation interne au groupe d'experts directement impliqués qui a été mis en œuvre. L'intervention d'experts extérieurs (et, le cas échéant, très spécialisés) serait souhaitable..

#### **PERSPECTIVES**

Il paraît important d'encourager la **poursuite de ce travail** et de déboucher ainsi sur un jeu d'indicateurs fondés, informatifs pour le citoyen, et utiles aux décideurs. De nombreuses pistes ont été identifiées et méritent d'être approfondies. Pour être pleinement satisfaisant, ce travail devrait être accompagné de manière plus claire par les institutions qui mettent leurs experts à disposition (y compris en termes de visibilité du travail), et appuyé par des moyens additionnels ciblés.

Outre la poursuite des travaux engagés dans SICFOR, il peut être intéressant de s'interroger sur l'intérêt d'un **élargissement du questionnement**, principalement centré sur les impacts du changement climatique sur les écosystèmes forestiers et sur l'adaptation de la gestion forestière. Les

questions du milieu professionnel (au-delà des seuls gestionnaires forestiers) mais aussi d'autres acteurs de la société qui s'interrogent notamment sur le maintien des services écosystémiques pourraient être intéressantes, même si les difficultés à identifier des indicateurs pertinents seraient sans doute plus importantes encore que celles rencontrées dans SICFOR.

Avec la multiplication des travaux sur les indicateurs, il devient de plus en plus opportun de développer ces travaux en **synergie** avec les **observatoires** existants au niveau national (ONERC, IGD Forêts) et régional, et les acteurs des différentes bases de données.

Quel que soit l'intérêt que suscitent les indicateurs, la qualité des développements futurs de ce travail reste contingente de dispositifs performants d'acquisition de données et que les travaux sur les indicateurs ne peuvent remplacer l'évaluation périodique et approfondie des connaissances de toutes natures, adossées ou non à des indicateurs.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Asse D., 2012. *Dépérissements forestiers et changement climatique : que nous enseignent les observations récentes de la forêt française ?* Mémoire de Master 1 Écologie Biodiversité Évolution, Université Paris Sud, 52p.
- Asse D., 2013. *Étude dendroclimatique du Hêtre (Fagus sylvatica L.) sur les plateaux calcaires de Bourgogne : analyse des incertitudes générées par les modèles climatiques à maille fine.* Mémoire de master 2 recherche Écologie Biodiversité Évolution, Université Paris Sud, 55p.
- Augspurger C.K., 2013. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. *Ecology*, 94 (1), 41-50
- Badeau V., 1995. *Étude dendroécologique du hêtre (Fagus sylvatica L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole.* Thèse, Université de Nancy 1, 250p.
- Badeau, V., 1998. Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers - Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. Les cahiers du DSF, 5-1998, Min. Agri. Pêche, DERF, Paris, ISSN 1270-9417, 211 p.
- Badeau, V., 1999. *Étude des relations entre l'état sanitaire des peuplements forestiers et les conditions de l'environnement. Premiers résultats de l'analyse spatio-temporelle de la partie française du réseau européen de suivi des dommages forestiers.* Rapport final à la CE et à la DERF, Inra Nancy, 172 p.+annexes.
- Badeau V., Bréda N., Landmann G., 1997. La récente crise de vitalité du hêtre en plaine semble largement liée aux déficits hydriques. *Les Cahiers du DSF*, 1-1997 (La Santé des Forêts [France] en 1996). Ministère de l'agriculture et de la pêche (DERF), Paris, pp. 60-63
- 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 : *Forest, Carbon Cycle and Climate Change*, Denis Loustau (Ed.). Quae, pp. 231-252
- Badeau, V., Rabastens, R., Nicolas, M., Ulrich, E., 2009. Changes in the chemical and/or physical forest soil condition. First results of Biosoil in France. The Biosoil project - Forest soil and biodiversity monitoring in the EU, Bruxelles, Belgique, 9 novembre 2009.
- Benson D.M., 1982. Cold inactivation of *Phytophthora cinnamomi*. *Phytopathology*, 72, 560-563
- Bertrand R., Lenoir J., Piedallu C., Riofrio-Dillo G., de Ruffray P., Vidal C., Pierrat J.-C., Gégout J.-C., 2011. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, vol. 479, 517-520
- Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63, 623–642.
- Bréda N., Cochard H., Dreyer E., Granier A., 1993. Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 1136-1143
- Bréda N., Granier A., Barataud F., Moyne C., 1995. Soil water dynamics in an oak stand. Part I. Soil moisture, water potentials and root water uptake. *Plant and Soil*, 172, 17-27
- Bréda N., Landmann G., 1995. Les contraintes hydriques : leur rôle dans les variations interannuelles de l'état des cimes des chênes. In : La santé des forêts [France] en 1994, Ministère de l'agriculture, DERF, Paris pp. 57-59



- Brisse H., de Ruffray P., Grandjouan G., Hoff M., 1995. European vegetation survey. The phytosociological database "Sophy". Part 1. Calibration of indicator plants. Part 2. Socio-ecological classification of the relevés. *Annals of Botany*, 53, 177-223.
- Brunvoll F., Höglund Davila E., Palm V., Ribacke S., Rypdal K., Tängdén L., 1999. Inventory of Climate Change Indicators for the Nordic Countries. *Statistics Norway*, documents 1999/16, 94 p.
- Cannell M.G.R., Palutikof J.P., Sparks T. H., 1999. Indicators of Climate Change in the UK. Climatic Research Unit and the Centre for Ecology and Hydrology
- Carnicer J., Coll M., Ninyerola M., Pons X., Sanchez G., Penuelas J., 2011. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, n°108, pp. 1474-1478
- Charrier G., Poirier M., Bonhomme M., Lacoïnte A., Améglio T., 2013. Frost hardiness in walnut trees (*Juglans regia* L.): How to link physiology and modelling ? *Tree Physiology* 33, 1229-1241
- Chatry C., Le Gallou J.-Y., Le Quentrec M., Lafitte J.-J., Laurens D., Creuchet B., Grelu J., 2010. *Rapport de la mission interministérielle changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts*. Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, Ministère de l'Intérieur, de l'Outre-mer et des Collectivités Territoriales, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 190 p.
- Cheuib A., Badeau V., Boé J., Chuine I., Delire C., Dufrêne E., François C., Gritti E., Legay M., Pagé C., Thuiller W., Viovy N., Leadley P., 2012. Climate change impacts on tree ranges: model inter-comparaison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology letters*, 533-544.
- Colin A., Hervé J.-C., Lucas S. (2011). Prélèvement de bois en forêt et production biologique : des estimations directes et compatibles. *L'IF*, n°28, 16 p.
- Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 2003. Le Climat, la nature, les gens : Indicateurs d'évolution du climat au Canada. 51p.
- De Vos B., Cools N. 2011. Second European Forest Soil Condition Report. Volume I: Results of the BioSoil Soil Survey. INBO.R.2011.35. Research Institute for Nature and Forest, Brussel. 359 p.
- de Vries W., Vel E., Reinds G.J., Deelstra H., Klap J.M., Leeters E.E.J.M., Hendriks C.M.A., Kerkvoorden M., Landmann G., Herkendell J., Hausmann T., Erismann J.W., 2003. Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe 1. Objectives, set-up and evaluation strategy. *Forest Ecology and Management* 174, 77-95
- Devictor V., Julliard R., Jiguet F., Couvet D., 2008. Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 275, 2743-2748
- Devictor V., van Swaay C., Brereton T., Brotons L., Chamberlain D., *et al.*, 2012. Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Climate Change*, 2,121-124
- Dorioz J., Bouix T., Gosselin F., Landmann G., Nivet C., Paillet Y., 2013. Projet Questind, vers l'élaboration d'un bouquet d'indicateurs partagés de la biodiversité en forêt. Rapport final. Paris : Gip Ecofor – Irstea – MEDDE, 121 p.
- Dupouey J.L., Bodin J. 2007. Déplacements déjà observés des espèces végétales : quelques cas emblématiques mais pas de migrations massives. *Rendez-vous techniques de l'ONF*, hors-série n° 3 « Forêts et milieux naturels face aux changements climatiques », 34-39
- European Environment Agency, 2008. Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment. EEA, No 4/2008, 246 p.

- European Environment Agency, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 – An indicator-based report. EEA, No 12/2012, 300 p.
- Fabre B., Loos R., Piou D., Marçais B., 2012. Is the Emergence of Dothistroma Needle Blight of Pine in France caused by the Cryptic Species *Dothistroma pini* ? *Phytopathology*, 102, 47-54
- Ferretti M., Bacaro G., Brunialti G., Calderisi M., Frati L., Pollastrini M., 2013. *Relationship between forest health and growth at the RENECOFOR plots*. Part 2. Final Report. Terra Data Environmetrics, 64 p.
- Ferretti M., Nicolas M., Bacaro G., Brunialti G., Calderisi M., Croisé L., Frati L., Lanier M., Maccherini S., Santi E., Ulrich E., 2014. Plot-scale modelling to detect size, extent, and correlates of changes in tree defoliation in French high forests. *Forest Ecology and management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.009>
- Fleisch M.-R., 1998. Les conséquences des gels tardifs du printemps 1997 sur les peuplements forestiers. *Les Cahiers du DSF*, 1-1998 (La Santé des Forêts [France] en 1997, Ministère de l'agriculture et de la pêche (DERF), Paris, pp. 42-44
- Gabrielsen P., Bosch P., 2003. Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting. EEA, 20 p.
- Gaillard J.-M., Mark Hewison A.-J., Klein F., Plard F., Douhard M., Davison R., Bonenfant C., 2013. How does climate change influence demographic processes of widespread species ? Lesson from the comparative analysis of contrasted populations of roe deer. *Ecology Letters*, 16, 48-57
- Gégout J. C., Condun C., Bailly G., Jabiol B., 2005. EcoPlant: a forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *Journal of Vegetation Science*, 16, 257-260.
- German federal cabinet, 2011. Adaptation Action Plan of the German Strategy for Adaptation to Climate Change. 73 p.
- Gis Sol, 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.
- Goudet M/ (2009) Le rougissement physiologique du douglas en 2008. Ministère de l'agriculture. Département de la santé des forêts, 3 p.  
[http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/rougissement\\_physiologique\\_douglas\\_en\\_2008.pdf](http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/rougissement_physiologique_douglas_en_2008.pdf)
- Goudet M., 2013. Résultats 2012 du réseau systématique de suivi des dommages forestiers. Bilan de la santé des forêts 2012. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt, Département de la santé des forêts, 14p.
- 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, 269–283
- Granier A., Bréda N., Longdoz B., Gross P., Ngao J., 2008. Ten years of fluxes and stand growth in a young beech forest at Hesse, North-eastern France. *Annals of Forest Science*, 65: 704
- Granier A., Lousteau D., Bréda N., 2000. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 57, 755-765
- Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I.A., Falge, E., Ciais, P., Grunwald, T., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Facini, O., Grassi, G., Heinesch, B., Ilvesniemi, H., Keronen, P., Knohl, A., Kostner, B., Lagergren, F., Lindroth, A., Longdoz, B., Loustau, D., Mateus, J., Montagnani, L., Nys, C., Moors, E., Papale, D., Peiffer, M., Pilegaard, K., Pita, G., Pumpanen, J., Rambal, S., Rebmann, C., Rodrigues, A., Seufert, G., Tenhunen, J., Vesala, I., Wang, Q., 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 123–145.
- Gros P. 2011. Ecosystèmes marins. In : *Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine*. Ecofor, MEDDTL, 142-143

- Gutierrez Teira A., Ramon Picatoste Ruggeroni J., 2012. *PNACC*, Evidencia de los impactos del cambio climático en España. Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente, Oficina Española de Cambio Climático, Oficina Espanola de Cambio Climatico, 27 p.
- Huart O., Proft (de) M., Grégoire J.-C., Piel F., Gaubicher B., Carlier F.-X., Maraître H., Rondeux J., 2003. Le point sur la maladie du hêtre en Wallonie. *Forêt Wallonne*, 64, 2-16
- Jonard M., Caignet I., Ponette Q., Nicolas M., 2013 : Evolution du carbone des sols forestiers de France métropolitaine – Détection et quantification à partir des données mesurées sur le réseau RENECOFOR. Rapport final d'étude subventionnée par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 55 p + annexes de 304 p
- Kadir T., Mazur L., Milanés C., Randles K., 2013. Indicators of Climate Change in California. California Environmental Protection Agency, Office of Environmental Health Hazard Assessment, 258 p.
- Lafferty K., 2009. The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology*, 90, 888-900
- Landmann G., 1988. Comment apprécier la vitalité d'un arbre ou d'un peuplement forestier ? *Revue forestière française*, vol. 38 (4), 65-284
- Landmann G., Pierrat J.-C., Nageleisen L.-M., 1999. 1995-97 : période de réajustement à la hausse de la notation de l'état des cimes des arbres forestiers en France. Département de la santé des forêts, Cahiers du DSF, 1-1999 (La santé des forêts en France en 1998), Min. Agri Pêche (Dref), Paris, 63-66
- Lebourgeois F., Pierrat J.-C., Perez V., Piedallu C., Cecchini S., Ulrich E., 2008. Déterminisme de la phénologie des forêts tempérées française : étude sur les peuplements du réseau RENECOFOR. *Revue Forestière Française*, 60 (3), 323-344
- Levrel H., 2007. Quels indicateurs pour la gestion de la biodiversité? Les Cahiers de l'IFB, ISSN 2111-4633 Paris : Institut français de la biodiversité, 94 p.
- Lorenz, M., Becher, G. (eds.). 2012. *Forest Condition in Europe, 2012 Technical Report of ICP Forests*. Work Report of the Thünen Institute for World Forestry 2012/1. ICP Forests, Hamburg, 2012.
- Loustau D. *et al.* . 2004, Rapport final du projet CARBOFOR : Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles, Programme GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique".
- Marçais B., Bergot M., Pérarnaud V., Lévy A., Desprez-Loustau M.-L., 2004. Prediction and mapping of the impact of winter temperatures on the development of *P. cinnamomi* induced cankers on red and pedunculate oak. *Phytopathology*, 94, 826-831
- Marçais B., Dupuis F., Desprez-Loustau M.-L., 1996. Modelling the influence of winter frosts on the development of the stem canker of red oak, caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Annals of Forest Science*, 53, 369-382
- Marçais, B., Desprez-Loustau, M.-L. 2012. European oak powdery mildew : impact on trees, effects of environmental factors, and potential effects of climate change. *Annals of Forest Science*, 10p.
- Mazur L., Milanés C., 2009. *Indicators of Climate Change in California*. California Environmental Protection Agency, Office of Environmental Health Hazard Assessment, Integrated Risk Assessment Branch, 197 p.
- Michelot A., Bréda N., Damesin C., Dufrêne E., 2012. Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 265, 161-171
- Ministry of agriculture and Forestry, Finland. 1996. Intergovernmental Seminar on Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management (ISCI Seminar). Helsinki, Finland, 19-22 August 1996.

- Montagné-Huck C., Niedzwiedz. A., 2011. Les indicateurs économiques et sociaux de gestion durable. Cahier du LEF Hors Série Technique n°3.
- Morfin G., 2013. *Recherche d'indicateurs bioclimatiques pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt en vue de proposer des pistes d'adaptation*. Mémoire de fin d'études formation ingénieur AgroSup Dijon, 66p.
- Nivet C., Gosselin M., Chevalier H., 2012. Évaluation des indicateurs nationaux de biodiversité forestière. In : *Les indicateurs de biodiversité forestière. Synthèse des réflexions issues du programme de recherche "Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques"*. Gip Ecofor, 41-55
- Nordic Council of Ministers, 2009. Signs of Climate Change in Nordic Nature. 52 p.
- North N., Kljun N., Kasser F., Heldstab J., Maibach M., Reutimann J., Guyer M., 2007. Changements climatiques en Suisse – Indicateurs des causes, des effets et des mesures. Etat de l'environnement n°0728. Office fédéral de l'environnement, Berne. 77 p.
- Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, 2010. Catalogue des indicateurs du changement climatique. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 30 p.
- Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage, 2012. Rapport scientifique 2012. 68p.
- Peiffer, M. 2005. *Paramétrisation du bilan hydrique et établissement des flux d'eau et de nutriments dans des séquences de hêtraies de plaine*. Doctorat sciences forestières, Paristech ENGREF
- Ponette, Q., Ulrich, E., Brêthes, A., Bonneau, M., Lanier, M., 1997. RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau, campagne de mesures 1993/95. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 100 - X, 427 p.
- Raffalli-Delerce G., Masson-Delmotte V., Dupouey J.-L., Stievenard M., Bréda N., Moisselin M., 2004. Reconstruction of summer droughts using tree-ring cellulose isotope: a calibration study with living oaks from Brittany (western France). *Tellus*, 56B, 160-174
- Reuter J.-C., 2005. Problèmes phytosanitaires sur le hêtre dans le Nord-Est. Bilan de la Santé des Forêts [France] en 2004, Min. Agri. Pêche (Département de la Santé des Forêts), Paris, 4 p.
- Robinet C., Rousselet J., Pineau P., Miard F., Roques A., 2013b. Are heat waves susceptible to mitigate the expansion of a species progressing with global warming? *Ecology and Evolution*, doi: 10.1002/ece3.690
- Robinet C., Rousselet J., Roques A., 2013a. Potential spread of the pine processionary moth in France: preliminary results from a simulation model and future challenges. *Annals of Forest Science*, DOI 10.1007/s13595-013-0287-7
- Robinet, C., Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., Roques, A., 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep., Notodontidae) in France, *Global Ecology and Biogeography* 16, 460–471
- Rodrigues A. (2009). *Le chêne pédonculé face au changement climatique*. Mémoire de fin d'étude, Formation des Ingénieurs Forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF, 80 p. + annexes
- Schmidt MW, Torn MS, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens IA, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning DA, Nannipieri P, Rasse DP, Weiner S, Trumbore SE, 2011: Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, *Nature*, 478: 49–56, doi:10.1038/nature10386
- Sergent A.S., Rozenberg P., Bréda N., 2012. Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less well on less fertile sites. *Annals of Forest Science*, 12 p.

- Soubeyroux J.-M., Kitova N., Blanchard M., Vidal J.-P., Martin E., Dandin P., 2012. Caractérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique. *Météorologie*, 78, 21-30
- Soubeyroux J.-M., Vidal J.-P., Najac J., Kitova N., Blanchard M., Dandin P., Martin E., Pagé C., Habets F., 2011. Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet, 72 p.
- Swaddle J.P., Calos S.E., 2008. Increased Avian diversity is associated with lower incidence of human west Nile infection: observation of the dilution effect. *PLoS ONE* 3(6): e2488
- Thauvin G. 2011. *Essai de détermination des causes de dépérissements du Pin sylvestre et du Sapin pectiné à l'échelle de la France et des Alpes-Maritimes*. Mémoire de fin d'étude, Formation des Ingénieurs Forestiers de l'AgroParisTech-ENGREF, 122 p.
- United States Environmental Protection Agency, 2010. Climate Change Indicators in the United States. 80 p.
- United States Environmental Protection Agency, 2012. Climate Change Indicators in the United States, 2012. 2<sup>nd</sup> Edition, 84 p.
- Van Wagner C.E., Pickett T.L., 1985. Équations et programme FORTAN de l'Indice Forêt-Météo de la méthode canadienne. Service canadien des forêts, Rapport technique de foresterie n°33F, 24p..
- Vennetier M. Girard F., Didier C., Ouarmim S. Rippert C., Misson L., Estève R., Martin W., Ndyae A. 2011. Adaptation phénologique du pin d'Alep au changement climatique. *Forêt Méditerranéenne* (32)2 151-167
- Vert J., Schaller N., Villien C. (coord.) 2013. Agriculture Forêt Climat : vers des stratégies d'adaptation, Centre d'études et de prospective, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 28-31
- Woods A., Coates K.D., Hamann A., 2005. Is an unprecedented *Dothistroma* needle blight epidemic related to climate change? *Bioscience*, 55, 761-769

## **ANNEXE 1 : LES INDICATEURS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FORET : SYNTHESE MONDIALE**

---

## Au niveau International

Pays	Organisme	Année de diffusion	Nombre total d'indicateurs de changement climatique	Indicateurs de changement climatique concernant le milieu forestier	Références
Etats-Unis	United States Environmental Protection Agency (EPA)	2010	24	Dates de débourrement et de floraison du chèvrefeuille et du lilas	United States Environmental Protection Agency, 2010. Climate Change Indicators in the United States. 80 p. <a href="http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/">http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/</a>
		2012	26	Dates de débourrement et de floraison du chèvrefeuille et du lilas Longueur de la saison du pollen d'Ambroisie	United States Environmental Protection Agency, 2012. Climate Change Indicators in the United States, 2012. 2nd Edition, 84 p. <a href="http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/">http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/</a>
Etats-Unis (Californie)	Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA)	2009	28	Taux de mortalité des arbres de 1982 à 2004 Surface de forêt brûlée (totale et par type de végétation) en Californie depuis 1950 Type de végétation forestière (aires de répartition de <i>Pinus ponderosa</i> depuis 1930 dans les forêts de la Sierra Nevada) Changements de répartition des plantes alpines et subalpines	Mazur L., Milanec C., 2009. Indicators of Climate Change in California. California Environmental Protection Agency, Office of Environmental Health Hazard Assessment, Integrated Risk Assessment Branch, 197 p.
		2013	36	<i>Indicateurs en plus de ceux de 2009 :</i> Densité des forêts subalpines de la Sierra Nevada, comparaison par type de peuplement des périodes 1929-1934 et 2007-2009 Changements d'aire de répartition de la végétation, exemple du canyon profond dans les montagnes de Santa Rosa comparaison entre 1977 et 2007	Kadir T., Mazur L., Milanec C., Randles K., 2013. Indicators of Climate Change in California. California Environmental Protection Agency, Office of Environmental Health Hazard Assessment, 258 p. <a href="http://oehha.ca.gov/multimedia/epic/2013EnvIndicatorReport.html">http://oehha.ca.gov/multimedia/epic/2013EnvIndicatorReport.html</a>
Canada	Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME)	2003	12	Date du début de floraison du peuplier faux-tremble dans la région d'Edmonton	Le Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, 2003. Le Climat, la nature, les gens : Indicateurs d'évolution du climat au Canada. 51p.
Australie	Australian Government Bureau of Meteorology	---	---	Durée moyenne de la saison de végétation de 1910 à 2011 (très peu détaillé)	<a href="http://www.bom.gov.au/climate/change/">http://www.bom.gov.au/climate/change/</a>

## La démarche commune des pays Européens

Pays	Organisme	Année de diffusion	Nombre total d'indicateur de changement climatique	Indicateurs de changement climatique concernant le milieu forestier	Références
33 pays membres et 6 pays coopérants	Agence européenne de l'environnement (AEE)	2008	40	Croissance des forêts ( <i>uniquement descriptif</i> ) Zones à risques pour les feux de forêts	European Environment Agency, 2008. Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment. EEA, No 4/2008, 246 p.
		2012	55	Croissance des forêts ( <i>uniquement descriptif</i> ) Feux de forêts : évolution des surfaces brûlées pour cinq pays depuis 1980 Stock de carbone en forêt ( <i>évoqué simplement</i> ) Indicateur de santé des forêts ( <i>évoqué simplement</i> ) <i>en plus sur le site internet :</i> Dommages des intempéries et des événements liés au climat (dont les feux de forêts) Agriculture et foresterie : le rendement des productions. <i>Pas de figure pour la forêt. En raison du manque de données le suivi de cet indicateur est interrompu.</i>	European Environment Agency, 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 – An indicator-based report. EEA, No 12/2012, 300 p. <a href="http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/">http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/</a>

## Les actions indépendantes des pays Européens

Pays	Organisme	Année de diffusion	Nombre total d'indicateur de changement climatique	Indicateurs de changement climatique concernant le milieu forestier	Références
Espagne	Agence d'État de Météorologie (AEMet)	depuis 2008	---	Rapport saisonnier sur la phénologie pour plusieurs espèces (aucun graphique d'évolution)	<a href="http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/vigilancia_sequia?w=0">http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/vigilancia_sequia?w=0</a>
	Agence espagnole pour le changement climatique (OECC)	2012	---	<i>Présentés comme « évidences » du changement climatique ; des indicateurs seront présentés prochainement :</i> la distribution des espèces, la phénologie, la productivité, les limites altitudinales, les incendies, les dépérissements	Gutierrez Teira A., Ramon Picatoste Ruggeroni J., 2012. <i>PNACC</i> , Evidencia de los impactos del cambio climático en España. Gobierno de España, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente, Oficina Española de Cambio Climático, Oficina Española de Cambio Climático, 27 p. <a href="http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/default.aspx">http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/default.aspx</a>
	Observatoire de la santé et du changement climatique (OSCC)	Prochainement	---	Indicateurs potentiels pour la santé liés aux changements climatiques	<a href="http://www.oscc.gob.es/es/general/indicadores/indicadores_es.htm">http://www.oscc.gob.es/es/general/indicadores/indicadores_es.htm</a>



Royaume-Uni	Environmental Change Network (ECN)	2003	34	Date de débourrement (pour le chêne) Santé des hêtres en Grande Bretagne	<a href="http://www.ecn.ac.uk/iccuk/">http://www.ecn.ac.uk/iccuk/</a> Cannell M.G.R., Palutikof J.P., Sparks T. H., 1999. Indicators of Climate Change in the UK. Climatic Research Unit and the Centre for Ecology and Hydrology
		depuis 2011	9	<i>aucun ne concerne le milieu forestier</i>	<a href="http://www.ecn.ac.uk/indicators">http://www.ecn.ac.uk/indicators</a>
Danemark, Finlande, Islande, Norvège et Suède	Nordic Council of Ministers (Norden)	1999	50	Croissance annuelle des forêts Production annuelle de bois	Brunvoll F., Höglund Davila E., Palm V., Ribacke S., Rypdal K., Tängdén L., 1999. Inventory of Climate Change Indicators for the Nordic Countries. <i>Statistics Norway</i> , documents 1999/16, 94 p.
		2009	14	Durée de la saison de végétation Date de début de la saison de végétation	Nordic Council of Ministers, 2009. Signs of Climate Change in Nordic Nature. 52p.
				Date de début de la pollinisation du bouleau Limites altitudinale et latitudinale de présence des arbres.	
Allemagne	KomPass	Prochainement	---	<i>Premier rapport basé sur des indicateurs sur l'adaptation au changement climatique en Allemagne (projet 2009-2014)</i>	<a href="http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/climate-energy/climate-change-adaptation/kompass">http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/climate-energy/climate-change-adaptation/kompass</a>
Suisse	Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse	---	---	Indice du printemps Date de floraison des cerisiers dans la campagne près de Liestal Apparition de la première feuille de marronnier à Genève (depuis 1808)	<a href="http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat_en_suisse/phenologie.html">http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/fr/climat/climat_en_suisse/phenologie.html</a>
		2007	30	Floraison des cerisiers à Liestal Propagation du palmier chanvre en Suisse méridional Adaptation de la gestion sylvicole	North N., Kljun N., Kasser F., Heldstab J., Maibach M., Reutimann J., Guyer M., 2007. Changements climatiques en Suisse – Indicateurs des causes, des effets et des mesures. Etat de l'environnement n°0728. Office fédéral de l'environnement, Berne. 77 p. <a href="http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00065/index.html?lang=fr">http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00065/index.html?lang=fr</a>
France	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC)	2010	25	Front d'expansion de la chenille processionnaire du pin	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, 2010. Catalogue des indicateurs du changement climatique. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 30 p. <a href="http://www.developpement-durable.gouv.fr/Catalogue-des-indicateurs-du.html">http://www.developpement-durable.gouv.fr/Catalogue-des-indicateurs-du.html</a>
		2011	---	Productivité primaire continentale (anomalie de 2000-2010)	<a href="http://www.universcience.fr/climobs/">http://www.universcience.fr/climobs/</a>

## ANNEXE 2 : FICHES D'ÉVALUATION DES INDICATEURS POTENTIELS

---

Les indicateurs bioclimatiques :

1. DEFICIT HYDRIQUE DES PEUPELEMENTS FORESTIERS
2. INDICE FORET METEO (OU FEU METEO)

Les indicateurs phénologiques :

3. DATE DE FEUILLAISSON
4. DATE DE FLORAISON
5. DATE DE MATURATION DES FRUITS
6. DATE DE COLORATION DES FEUILLES

Les indicateurs de productivité et de santé des forêts :

7. DEFICIT FOLIAIRE
8. MORTALITE DE BRANCHES DANS LE HOUPPIER FONCTIONNEL
9. LA MORTALITE DES ARBRES
10. LA CROISSANCE RADIALE
11. STOCK DE CARBONE DES SOLS

Les indicateurs de répartition des organismes :

12. OPTIMUM ALTITUDINAL DE PRESENCE DES ESPECES
13. REPARTITION DES ESPECES THERMOPHILES
14. REPARTITION DES ESPECES CONTINENTALES, ATLANTIQUES
15. DETTE CLIMATIQUE (*décalage entre déplacement réel et attendu des espèces*)
16. PRESENCE DE L'ENCRE A *PHYTOPHTHORA CINNAMOMI* SUR CHENE
17. PRESENCE DE *DOTHISTROMA PINI* SUR PIN LARICIO
18. EXPANSION DU FRONT DE LA CHENILLE PROCESSIONNAIRE DU PIN

## LES INDICATEURS BIOCLIMATIQUES

### FICHES PRESENTEES :

- DEFICIT HYDRIQUE DES PEUPEMENTS FORESTIERS
- INDICE FORET METEO (OU FEU METEO)

**Avertissement : les descriptions données dans ces fiches n'ont pas – par manque de temps – été modifiées après la réunion de restitution du projet, même quand cette dernière a conduit à nuancer ou modifier certaines appréciations qu'elles comportent. Ce travail devra être fait, le cas échéant, dans le prolongement du projet SICFOR.**

<b>DEFICIT HYDRIQUE DES PEUPLEMENTS FORESTIERS</b>
--

**Identification**

<b>Nom de l'expert référent</b>	<b>Vincent BADEAU</b>
<b>Nom de l'indicateur</b>	<b>Déficit hydrique des peuplements forestiers (-1- ; -2-)</b>
Unités de l'indicateur	Sans unité
Public ciblé	<b>Gestionnaires forestiers, chercheurs</b>
Espèces ciblées	Décidues et sempervirents
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Couverture <b>nationale</b>

**Données et échelles**

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	UMR EEF - Biljou©
Variables brutes utilisées	<b>SAFRAN Météo-France</b>
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Calcul de bilan hydrique forestier</b>
Protocole utilisé	Modèle Biljou© (-1- ; -2-)
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	Région / Grands massifs forestiers / Sylvoécocorégion (SER)
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Non
Maille de résolution spatiale	<b>8 km</b>
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	<b>1959</b>
Périodicité des mesures	<b>Journalière</b>

**Méthode de calcul**

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Traitement des données
Indicateur simple ou composite (indice)	Composite (indice de stress, date de début de stress, durée du stress)
Traitements appliqués aux données	Modélisation

**Signification**

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Quantification des niveaux de sécheresses annuelles</b>
Que représente cet indicateur en termes de fonctionnement des forêts ?	Impact sur la croissance radiale chez certaines essences
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>Température, précipitation, humidité, rayonnement, vitesse du vent</b>
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Causalité

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	réserve utile des sols / LAI indice foliaire des peuplements / phénologie
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	Trame verte et bleue
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>courbes / cartes / tableau</b>

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Indicateur dépendant de la <b>qualité des données météo</b> , de la <b>connaissance des sols</b> et des <b>peuplements</b>
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	<b>Pas de réserve</b>
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	<b>Forte</b>
Précision de l'indicateur	<b>Forte</b>
Robustesse, fragilité face aux biais	<b>Robuste</b>

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Calculé sur l'actuel mais non distribué / à calculer pour les climats futurs</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Collecte de données (données sol) / diffusion</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	<b>Recrutement d'un Ingénieur de Recherche</b> en CDD pendant 1 à 2 ans soit de l'ordre de 200k€
Remarques additionnelles	<b>Un site internet</b> a été mis au point à destination d'opérateurs avertis (agents de développement forestiers notamment). Il permet l'utilisation du modèle BILJOU© de façon rapide pour simuler le fonctionnement hydrique des peuplements réels sous les conditions climatiques observés. Deux autres indicateurs écophysologiques de sécheresse peuvent être calculé : <b>la date de début du déficit hydrique</b> et <b>la durée du déficit hydrique (-3-)</b>

<b>INDICE FORET METEO (OU FEU METEO)</b>
--

**Identification**

<b>Nom de l'expert référent</b>	<b>Grégoire PIGEON</b>
<b>Nom de l'indicateur</b>	<b>Indice Forêt Météo (ou Feu Météo)</b>
Unités de l'indicateur	Sans unité
Public ciblé	<b>sécurité civile</b>
Espèces ciblées	Toutes
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Nationale

**Données et échelles**

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	Réseaux d'observations météorologiques nationaux et systèmes numériques de réanalyse climatique et de projection climatique
Variables brutes utilisées	<b>Température ; précipitation ; vent ; humidité</b>
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>mesure / modélisation numérique</b>
Protocole utilisé	mesure météorologique / modèle de climat
Echelle géographique ciblée	<b>France pour les mesures / Europe et Monde pour les modèles climatiques</b>
Représentativité spatiale	kilométrique
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Oui
Maille de résolution spatiale	<b>10 km</b>
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	<b>1958</b>
Périodicité des mesures	<b>journalières</b>

**Méthode de calcul**

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Traitement numérique sur mesure directe et modélisation directe
Indicateur simple ou composite (indice)	Composite : résultat d'un calcul numérique
Traitements appliqués aux données	Dans le cas des mesures : homogénéisation des longues séries de mesures / dans le cas de la modélisation application de correction de débaisage

**Signification**

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>La situation climatique est elle devenue ou deviendra-t-elle plus ou moins favorable à l'occurrence de feu ?</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	sécheresse
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>température, précipitation, humidité, vent</b>

Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	L'augmentation des températures et la diminution des précipitations en été augmentent les risques d'incendie
Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Évolution des espèces présentes / évolution du nombre de départ de feu
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>courbes / cartes / tableau</b>

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Indicateur issu d'un calcul => cumul les erreurs sur indicateurs en entrée
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	<b>A intégrer avec l'évolution de la végétation dans le futur</b>
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	
Précision de l'indicateur	
Robustesse, fragilité face aux biais	<b>Phénomène à seuil</b>

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Oui</b> suite à la mission interministérielle sur l'évolution des systèmes de prévention
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Besoin d'organisation et diffusion</b> pour la mise à disposition et <b>l'actualisation</b> suite à de nouvelles projections climatiques
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Manques	
Remarques additionnelles	

## Références - indicateurs bioclimatiques

1- Granier A., Badeau V., Bréda N. (1995) Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue forestière française*, 47, 59-68. ;

2- Granier A., Bréda N., Biron P., Vilette S., 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stand. *Ecological Modelling*, 116, 269-283.

3- <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/index.php?p=accueil>

## LES INDICATEURS PHENOLOGIQUES

### FICHES PRESENTEES :

- DATE DE FEUILLAISSON
- DATE DE FLORAISON
- DATE DE MATURATION DES FRUITS
- DATE DE COLORATION DES FEUILLES
- DEGATS PRECOCES DU GEL

**Avertissement : les descriptions données dans ces fiches n'ont pas – par manque de temps – été modifiées après la réunion de restitution du projet, même quand cette dernière a conduit à nuancer ou modifier certaines appréciations qu'elles comportent. Ce travail devra être fait, le cas échéant, dans le prolongement du projet SICFOR.**



## DATE DE FEUILLAISSON

**Identification**

<b>Nom de l'expert référant</b>	<b>Isabelle CHUINE</b>
<b>Nom de l'indicateur</b>	<b>Date de feuillaison</b>
Unités de l'indicateur	jour de l'année
Public ciblé	<b>Tout public</b>
Espèces ciblées	Principales essences forestières, reste à déterminer lesquelles
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Communes

**Données et échelles**

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	GDR 2968 ( <a href="http://www.gdr2968.cnrs.fr">www.gdr2968.cnrs.fr</a> )
Variables brutes utilisées	<b>Dates</b>
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Suivis</b>
Protocole utilisé	<a href="http://www.gdr2968.cnrs.fr">www.gdr2968.cnrs.fr</a> ; <a href="http://www.obs-saisons.fr">www.obs-saisons.fr</a>
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	~100 sites répartis sur tout le territoire Métropolitain
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	<b>Europe, USA, Canada</b>
Maille de résolution spatiale	Points
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	~ <b>1850</b> (mais pas les sites encore actifs)
Périodicité des mesures	<b>données annuelles</b>

**Méthode de calcul**

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Direct
Indicateur simple ou composite (indice)	Indicateur simple
Traitements appliqués aux données	Aucun

**Signification**

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Impact du changement climatique sur le cycle de développement des arbres et ses conséquences fonctionnelles</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Impliqué dans le cycle du carbone et de l'eau, la croissance, la survie et le succès reproducteur de l'arbre
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>Température, et secondairement photopériode, humidité du sol</b>
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Causalité directe

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Taille (élagage) de l'arbre
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	Cycle du carbone et de l'eau, productivité
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>courbes, cartes</b>

### Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Fiabilité relativement élevée
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	<b>Très forte</b>
Précision de l'indicateur	Elevée
Robustesse, fragilité face aux biais	Bonne

### Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Non</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Analyse des données existantes pour construction de l'indice</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	Quelques mois de CDD (pour les quatre indicateurs phénologiques)
Manques	
Références bibliographiques	
Remarques additionnelles	

## DATE DE FLORAISON

**Identification**

<b>Nom de l'expert référent</b>	<b>Isabelle CHUINE</b>
<b>Nom de l'indicateur</b>	<b>Date de floraison</b>
Unités de l'indicateur	jour de l'année
Public ciblé	<b>Tout public</b>
Espèces ciblées	Principales essences forestières, reste à déterminer lesquelles
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Communes

**Données et échelles**

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	GDR 2968 ( <a href="http://www.gdr2968.cnrs.fr">www.gdr2968.cnrs.fr</a> )
Variables brutes utilisées	<b>Dates</b>
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Suivis</b>
Protocole utilisé	<a href="http://www.gdr2968.cnrs.fr">www.gdr2968.cnrs.fr</a> ; <a href="http://www.obs-saisons.fr">www.obs-saisons.fr</a>
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	~60 sites répartis sur tout le territoire métropolitain
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	<b>Europe, USA, Canada</b>
Maille de résolution spatiale	Points
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	~ <b>1850</b> (mais pas les sites encore actifs)
Périodicité des mesures	<b>données annuelles</b>

**Méthode de calcul**

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Direct
Indicateur simple ou composite (indice)	Indicateur simple
Traitements appliqués aux données	Aucun

**Signification**

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Impact du changement climatique sur le cycle de développement des arbres et ses conséquences fonctionnelles</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Impliqué dans le succès reproducteur de l'arbre
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>Température, et secondairement photopériode, humidité du sol</b>
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Causalité directe

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Taille (élagage) de l'arbre
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	Régénération de la forêt, culturel, pollinisation
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>courbes, cartes</b>

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Fiabilité relativement élevée
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	<b>Très forte</b>
Précision de l'indicateur	Élevée
Robustesse, fragilité face aux biais	Bonne

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Non</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Analyse des données existantes pour construction de l'indice</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	Quelques mois de CDD (pour les quatre indicateurs phénologiques)
Manques	
Références bibliographiques	
Remarques additionnelles	

## DATE DE MATURATION DES FRUITS

**Identification**

Nom de l'expert référant	Isabelle CHUINE
Nom de l'indicateur	Date de fructification (maturation des fruits)
Unités de l'indicateur	jour de l'année
Public ciblé	Tout public
Espèces ciblées	Principales essences forestières, reste à déterminer lesquelles
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Communes

**Données et échelles**

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	GDR 2968 (www.gdr2968.cnrs.fr)
Variables brutes utilisées	Dates
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	Suivis
Protocole utilisé	www.gdr2968.cnrs.fr; www.obs-saisons.fr
Echelle géographique ciblée	Nationale
Représentativité spatiale	~5 sites répartis sur tout le territoire métropolitain
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Europe, USA, Canada
Maille de résolution spatiale	Points
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	~1850 (mais pas les sites encore actifs)
Périodicité des mesures	données annuelles

**Méthode de calcul**

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Direct
Indicateur simple ou composite (indice)	Indicateur simple
Traitements appliqués aux données	Aucun

**Signification**

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	Impact du changement climatique sur le cycle de développement des arbres et ses conséquences fonctionnelles
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Impliqué dans le succès reproducteur de l'arbre
A quelles variables climatiques est-il relié ?	Température, et secondairement humidité du sol
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Causalité directe

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Taille (élagage) de l'arbre
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	Régénération de la forêt, culturel
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>courbes, cartes</b>

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Fiabilité relativement élevée
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	<b>Très forte</b>
Précision de l'indicateur	Élevée
Robustesse, fragilité face aux biais	Bonne

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Non</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Analyse des données existantes pour construction de l'indice</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	Quelques mois de CDD (pour les quatre indicateurs phénologiques)
Manques	
Références bibliographiques	
Remarques additionnelles	

## DATE DE COLORATION DES FEUILLES

**Identification**

<b>Nom de l'expert référant</b>	<b>Isabelle CHUINE</b>
<b>Nom de l'indicateur</b>	<b>Date de coloration des feuilles</b>
Unités de l'indicateur	jour de l'année
Public ciblé	<b>Tout public</b>
Espèces ciblées	Principales essences forestières, reste à déterminer lesquelles
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Communes

**Données et échelles**

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	GDR 2968 ( <a href="http://www.gdr2968.cnrs.fr">www.gdr2968.cnrs.fr</a> )
Variables brutes utilisées	<b>Dates</b>
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Suivis</b>
Protocole utilisé	<a href="http://www.gdr2968.cnrs.fr">www.gdr2968.cnrs.fr</a> ; <a href="http://www.obs-saisons.fr">www.obs-saisons.fr</a>
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	~100 sites répartis sur tout le territoire métropolitain
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	<b>Europe, USA, Canada</b>
Maille de résolution spatiale	Points
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	~ <b>1850</b> (mais pas les sites encore actifs)
Périodicité des mesures	<b>données annuelles</b>

**Méthode de calcul**

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Direct
Indicateur simple ou composite (indice)	Indicateur simple
Traitements appliqués aux données	Aucun

**Signification**

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Impact du changement climatique sur le cycle de développement des arbres et ses conséquences fonctionnelles</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	impliqué dans le cycle du carbone et de l'eau, la croissance, la survie et le succès reproducteur de l'arbre
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>Température et photopériode, secondairement humidité du sol</b>
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Causalité directe

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Attaques parasitaires
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	Cycle du carbone et de l'eau, productivité
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>courbes, cartes</b>

### Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Fiabilité relativement élevée
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	<b>Forte</b>
Précision de l'indicateur	Bonne
Robustesse, fragilité face aux biais	Moyenne

### Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Non</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Analyse des données existantes pour construction de l'indice</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	Quelques mois de CDD (pour les quatre indicateurs phénologique)
Manques	
Références bibliographiques	
Remarques additionnelles	



## **LES INDICATEURS DE PRODUCTIVITE ET DE SANTE DES FORETS**

### FICHES PRESENTEES :

- DEFICIT FOLIAIRE
- MORTALITE DE BRANCHES DANS LE HOUPPIER FONCTIONNEL
- LA MORTALITE DES ARBRES
- LA CROISSANCE RADIALE
- STOCK DE CARBONE DES SOLS

**Avertissement : les descriptions données dans ces fiches n'ont pas – par manque de temps – été modifiées après la réunion de restitution du projet, même quand cette dernière a conduit à nuancer ou modifier certaines appréciations qu'elles comportent. Ce travail devra être fait, le cas échéant, dans le prolongement du projet SICFOR.**

## DEFICIT FOLIAIRE

## Identification

Nom de l'expert référant	<b>Fabien Caroulle (DSF) et Manuel Nicolas (ONF)</b>
Nom de l'indicateur	<b>Déficit foliaire</b>
Unités de l'indicateur	% (les observations par arbres sont exprimées par classe de 5 %)
Public ciblé	<b>Forestiers, scientifiques et grand public</b>
Espèces ciblées	Espèces les plus répandues en forêt française et dont le nombre d'arbres effectivement échantillonnés dans les réseaux de suivi est suffisant (au moins chênes, hêtre, pins, sapin, épicéa)
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Principales essences de production, à élargir potentiellement suivant l'analyse à approfondir des données de niveau I

## Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	- Réseau de suivi systématique des dommages forestiers (Niveau I, 16 km x 16 km, DSF) - Réseau RENECOFOR (Niveau II) ONF
Variables brutes utilisées	Déficit foliaire
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Mesure</b>
Protocole utilisé	<b>Protocole DSF</b> appliqué à 20 arbres par site de niveau I (arbres dominants de toutes essences) et 52 arbres par site de niveau II (arbres dominants de l'essence principale) (-1-)
Echelle géographique ciblée	<b>France métropolitaine</b>
Représentativité spatiale	Environ <b>550 sites</b> répartis sur maillage systématique 16 km x 16 km sur toute la métropole + <b>102 sites</b> RENECOFOR répartis dans les principaux contextes de forêt de production
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Réseau européen ICP Forests : environ 7000 sites sur maillage systématique de niveau I + 800 sites de niveau II
Maille de résolution spatiale	Maillage systématique 16 km x 16 km + sites de niveau II
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	<b>1989</b> sur réseau systématique et <b>1994</b> sur RENECOFOR. Attention : accroissement de la sévérité de notation de 1994 à 1997 en particulier pour les feuillus, correspondant à une période de mise en place de la calibration des notateurs => il est <b>conseillé de faire commencer les séries temporelles en 1997</b> .
Périodicité des mesures	<b>Annuelle</b>

## Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Agrégation nationale des mesures par arbre, avec possibilités de ventilation à étudier
Indicateur simple ou composite (indice)	Simple
Traitements appliqués aux données	A définir suivant le format de l'indicateur (cf besoin de développement indiqué dans les limites et perspectives)

## Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Comment évolue l'état sanitaire des forêts métropolitaines ?</b>
Que représente cet indicateur en termes de fonctionnement des forêts ?	Indicateur intégrateur de la réponse des arbres à de <b>nombreux stress biotiques et abiotiques et corrélé en moyenne à leur vigueur</b> (corrélation négative mise en évidence avec la croissance radiale moyenne sur 10 ans sur le réseau RENECOFOR, et cohérente avec d'autres publications européennes) (-2-)
A quelles variables climatiques est-il relié ?	Relation des variations interannuelles de déficit foliaire principalement avec les <b>variations interannuelles de l'alimentation hydrique</b> (P, P-ETP) y compris des années précédentes (N-1 et N-2), mais <b>pas avec les variations de température moyenne</b> (-3- ; -4-)
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	<b>Corrélation</b> des variations annuelles avec les <b>paramètres d'alimentation hydrique</b> , le plus souvent négative mais parfois positive (-4-)
Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche publiée à partir des données RENECOFOR (-4-)
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	<b>Aux éclaircies</b> et autres <b>perturbations du peuplement</b> (variations de densité de tiges) et pour une minorité de site à la <b>fréquence de symptômes sanitaires</b> relevés par arbre. Pas de relations en revanche avec l'évolution de la nutrition foliaire, de la phénologie ni avec les variations d'équipe d'observateurs.
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	Diverses possibilités (à compléter suivant l'analyse à approfondir des données de niveau I) : - <b>graphes d'évolution temporelle</b> de la distribution des valeurs par essence (ex : boxplot), - <b>cartes de tendances par site</b> (sens de tendance et niveau de significativité), - <b>tableau de hiérarchisation</b> des facteurs explicatifs des évolutions constatées sur les sites RENECOFOR

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Assurance qualité assise sur un <b>protocole écrit et mis à jour</b> , la <b>formation continue des opérateurs</b> , la <b>saisie directe et centralisée</b> des données sur serveur puis leur <b>validation par le DSF</b> . De plus <b>contrôle et quantification des incertitudes</b> par l'organisation d'intercalibrations et de relevés de contrôle sur les sites chaque année. (-1- ; -4-)
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	<b>France métropolitaine</b>
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	- Avantages : <b>suivi quantitatif comparable dans le temps</b> (qualité contrôlée) sur un maillage extensif (niveau I), et <b>suivi des relations avec les variations climatiques</b> au sein d'une large gamme de paramètres environnementaux (niveau II) - Réserve : <b>recul temporel un peu juste</b> mais <b>néanmoins suffisant</b> pour l'analyse statistique de tendances et intéressant au regard de la forte augmentation des températures moyennes depuis les années 1990
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b> de par l'expérience de suivi national et européen depuis 20 ans
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	Variations interannuelles significatives, en réponse notamment à des années exceptionnelles comme 2003 (-4-)
Précision de l'indicateur	A l'échelle d'un arbre, 76 % d'écarts entre observateurs < 5 % et 92 % d'écarts < 10 %. (-4-)
Robustesse, fragilité face aux biais	Poids négligeable des variables méthodologiques (changements d'équipe d'observateurs, date de relevé) dans l'explication des variations interannuelles de déficit foliaire. (-4-)

### Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	Indicateur mis à jour tous les 5 ans dans les "indicateurs de gestion durable" mais à <b>adapter et étayer en tant qu'indicateur d'impact de changement climatique.</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Besoin d'analyse statistique approfondie des données du réseau systématique en lien avec les acquis du réseau RENECOFOR, en vue du développement de l'indicateur en tant qu'indicateur d'impact du changement climatique</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	Étude (un an d'ingénieur)
Manques	
Remarques additionnelles	

## MORTALITE DE BRANCHES DANS LE HOUPPIER FONCTIONNEL

## Identification

Nom de l'expert référent	Fabien Caroulle
Nom de l'indicateur	Mortalité de branches dans le houppier fonctionnel
Unités de l'indicateur	
Public ciblé	
Espèces ciblées	Espèces principales
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Principales essences forestières

## Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	IGN
Variables brutes utilisées	Mortalités de branches
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	Mesure de l'Inventaire forestier national (-5-)
Protocole utilisé	IMOT IGN (-5-)
Echelle géographique ciblée	Nationale
Représentativité spatiale	
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Non
Maille de résolution spatiale	1*1km
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	Fin 2005 (-5-)
Périodicité des mesures	prise de mesure en <b>continu</b>

## Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Direct
Indicateur simple ou composite (indice)	Simple
Traitements appliqués aux données	A développer

## Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	Comment évolue le houppier fonctionnel des arbres ?
Que représente cet indicateur en termes de fonctionnement des forêts ?	
A quelles variables climatiques est-il relié ?	
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Tassement de sols, pathogènes...
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	Cartes, tableaux

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Formation des équipes IGN possibilité de croisement avec les notations du réseau systématique DSF, à titre de comparaison
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	<b>Zone d'étude géographique large</b> pour obtenir un résultat robuste essence par essence
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	Problème : <b>notation hivernale</b> où la notation des branches mortes est <b>sous-évaluée chez les feuillus</b>
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Faible</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	
Précision de l'indicateur	
Robustesse, fragilité face aux biais	La <b>zone d'étude</b> doit être <b>suffisamment large</b>

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	En interne au DSF
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Définition d'une méthodologie</b> robuste et validée scientifiquement de l'indicateur à <b>partir des données collectées par l'IGN et validées par le DSF</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Manques	
Remarques additionnelles	

## LA MORTALITE DES ARBRES

**Identification**

<b>Nom de l'expert référent</b>	<b>Jean-Christophe Hervé</b>
<b>Nom de l'indicateur</b>	<b>La mortalité des arbres</b>
Unités de l'indicateur	
Public ciblé	
Espèces ciblées	Espèces principales
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Principales essences forestières

**Données et échelles**

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	<b>IGN</b>
Variables brutes utilisées	mortalité globale ou encore le nombre de chablis non exceptionnels ou les arbres morts sur pied
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Mesure de l'Inventaire forestier national</b>
Protocole utilisé	
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	
Maille de résolution spatiale	1*1km
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	environ <b>50 ans</b>
Périodicité des mesures	prise de mesure en <b>continu</b>

**Méthode de calcul**

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Direct
Indicateur simple ou composite (indice)	Simple
Traitements appliqués aux données	A développer

**Signification**

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>La mortalité des arbres augmentera t-elle dans le futur ?</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	productivité, vitalité des arbres
A quelles variables climatiques est-il relié ?	complexe en fonction des espèces
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	pathogènes...
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	Cartes, tableaux, courbes

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Formation des équipes IGN
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	<b>Zone d'étude géographique large</b> pour obtenir un résultat robuste essence par essence
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Faible</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	
Précision de l'indicateur	
Robustesse, fragilité face aux biais	La <b>zone d'étude</b> doit être <b>suffisamment large</b>

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	Non
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	un nouvel axe de recherche à l'IGN : création d'un nouveau laboratoire de l'IGN qui visera à établir des indicateurs d'impacts du changement climatique (croissance et mortalité) à partir des données de l'IFN
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Manques	
Remarques additionnelles	Un paramètre qu'il ne faut pas sous estimer est que le stock de bois vifs en forêt française a augmenté ces 50 dernières années.



LA CROISSANCE RADIALE
-----------------------

**Identification**

Nom de l'expert référent	Jean-Christophe Hervé
Nom de l'indicateur	La croissance radiale
Unités de l'indicateur	
Public ciblé	
Espèces ciblées	Espèces principales
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Principales essences forestières

**Données et échelles**

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	IGN
Variables brutes utilisées	
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	Mesure de l'Inventaire forestier national (-5-)
Protocole utilisé	
Echelle géographique ciblée	Nationale
Représentativité spatiale	
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	
Maille de résolution spatiale	1*1km
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	environ 50 ans
Périodicité des mesures	prise de mesure en continu

**Méthode de calcul**

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	
Indicateur simple ou composite (indice)	
Traitements appliqués aux données	A développer

**Signification**

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	Comment évoluera la croissance radiale des arbres à l'avenir ?
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Notion de productivité, santé des forêts
A quelles variables climatiques est-il relié ?	Toutes
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	âge, sylviculture, pathogènes...
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	Cartes, courbes

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Formation des équipes IGN
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	<b>Zone d'étude géographique large</b> pour obtenir un résultat robuste essence par essence
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	
Précision de l'indicateur	
Robustesse, fragilité face aux biais	La <b>zone d'étude</b> doit être <b>suffisamment large</b>

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	Non
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	un nouvel axe de recherche à l'IGN : création d'un nouveau laboratoire de l'IGN qui visera à établir des indicateurs d'impacts du changement climatique (croissance et mortalité) à partir des données de l'IFN
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Manques	
Remarques additionnelles	

## STOCK DE CARBONE DES SOLS

## Identification

Nom de l'expert référent	Manuel Nicolas
Nom de l'indicateur	Stock de carbone des sols
Unités de l'indicateur	t.ha-1
Public ciblé	Forestiers, scientifiques et grand public
Espèces ciblées	
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	

## Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	<b>RENECOFOR (ONF) : 2 campagnes de mesure réalisées et comparables</b> (-6- ; -7-) + potentiellement dans 10 ans après deuxième campagne, <b>RMQS (Inra Orléans)</b> (-8-) + potentiellement si possibilité de correction des biais méthodologiques entre les deux campagnes réalisées, <b>Réseau systématique de suivi des dommages forestiers (DSF)</b> (-9- ; -10-)
Variables brutes utilisées	Concentration en C organique des sols et des litières + densité apparente et profondeur de prélèvement (sol minéral) ou masse surfacique (litière)
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Mesures</b>
Protocole utilisé	RENECOFOR : protocole de prélèvement comparable au cours du temps avec répétitions spatiales intra-site, analyses suivant méthodes normées avec laboratoire accrédité et incertitudes quantifiées (-11-)
Echelle géographique ciblée	<b>France métropolitaine</b>
Représentativité spatiale	RENECOFOR : <b>102 points</b> répartis dans les principaux contextes de forêt de production
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Dans le cadre du <b>programme ICP-Forests</b> , mesures harmonisées sur le niveau I européen en 2007-2008 (Biosoil) et quelques pays disposant de répétitions de mesure comparables dans le temps (Allemagne, Belgique...) (-12-)
Maille de résolution spatiale	RENECOFOR : répartition nationale non systématique
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	1ère campagne en <b>1993-1995</b> sur <b>RENECOFOR</b> et <b>réseau systématique</b> , en <b>2000-2009</b> sur <b>RMQS</b> (-6- ; -9- ; -8-)
Périodicité des mesures	Environ <b>15 ans</b>

## Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Direct
Indicateur simple ou composite (indice)	Simple
Traitements appliqués aux données	Calcul du stock de C par couche puis somme des couches à l'échelle de chaque grappe de prélèvement

## Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Les sols forestiers jouent-ils un rôle de puits ou de source de carbone ?</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	<b>Indicateur de bilan entrées-sorties de carbone</b> (production de biomasse photosynthétique - respiration liée à l'activité biologique des sols), potentiellement sensible à l'évolution du climat
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>A toutes les variables climatiques</b> pouvant avoir un effet sur la production de biomasse et l'activité biologique des sols (température, alimentation hydrique...)
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	<b>Effet d'atténuation du changement climatique</b> , avec rétroaction potentielle (positive ou négative)
Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche (-13-)
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	<b>Fertilité des sols</b> (chimique, physique et biologique) et (potentiellement) <b>gestion forestière</b>
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	Atténuation, production de biomasse
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	Cartes, tableaux (-7-)

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	- RENECOFOR et RMQS : réseaux de suivi avec <b>protocoles</b> d'échantillonnage et d'analyse <b>strictement comparables au cours du temps, méthodes d'analyse normées et incertitudes quantifiées</b> , archivage des surplus d'échantillons.  - Réseau systématique de suivi des dommages forestiers : <b>protocole comparable à l'échelle européenne</b> en 2007-2008 (Biosoil), mais différent de la campagne 1993-1995 pour l'échantillonnage et l'analyse (-11-)
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	RENECOFOR : Indicateur du sens et de l'amplitude de l'évolution temporelle (source ou puits de carbone), mais <b>limites d'interprétation à donner quant à une extrapolation potentielle à l'ensemble des sols forestiers</b> de France par nature très hétérogènes (en particulier dans l'optique de quantifier un flux moyen national) (-7-)
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	- Avantages : indicateur <b>mesuré à l'échelle nationale</b> suivant <b>protocole fiable et comparable au cours du temps</b> , capacité avérée de <b>détection d'évolutions temporelles après 15 ans</b> , distinction des <b>évolutions temporelles de la variabilité spatiale intra-site, éléments de compréhension</b> au regard de l'ensemble des paramètres environnementaux suivis sur les sites RENECOFOR  - Réserves : <b>mise à jour tous les 15 ans</b> voire au mieux tous les dix ans en jonglant entre réseaux RENECOFOR et RMQS, <b>limites d'interprétation à donner quant à une extrapolation potentielle</b> à l'ensemble des sols forestiers de France par nature très hétérogènes (en particulier dans l'optique de quantifier un flux moyen national) (-7-)
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	Lente
Précision de l'indicateur	Capacité de détection quantifiée à l'échelle d'un site RENECOFOR
Robustesse, fragilité face aux biais	<b>Forte assise méthodologique</b>

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	Indicateur <b>intégré dans les "indicateurs de gestion durable"</b> mais à <b>adapter</b> (focaliser sur le carbone) et à <b>mettre à jour</b> (pas encore de répétition de mesure disponible en 2010)
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	Indicateur envisageable actuellement à partir des deux campagnes de mesure réalisées sur les 102 sites du réseau RENECOFOR (besoin uniquement de développement) ; mises à jour ultérieures dépendantes de <b>la réalisation et de l'analyse de nouvelles campagnes</b> de mesure sur RENECOFOR ou RMQS
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	Développement : 10 HJ ?
Manques	
Remarques additionnelles	

## Références – Productivité et santé des forêts

- 1- Département de la Santé des Forêts, 2011. Manuel de notation des dommages forestiers (symptômes, causes, état des cimes). Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire, 49 p.
- 2- Ferretti M., Bacaro G., Brunialti G., Calderisi M., Frati L., Pollastrini M., 2013. Relationship between forest health and growth at the RENECOFOR plots. Part 2. Final Report. Terra Data Environmetrics, 64 p.
- 3- Badeau, V., 1999. Etude des relations entre l'état sanitaire des peuplements forestiers et les conditions de l'environnement. Premiers résultats de l'analyse spatio-temporelle de la partie française du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Rapport final à la CE et à la DERF, Inra Nancy, 172 p.+annexes.
- 4- Ferretti M., Nicolas M., Bacaro G., Brunialti G., Calderisi M., Croisé L., Frati L., Lanier M., Maccherini S., Santi E., Ulrich E., 2013. Plot-scale modelling to detect size, extent, and correlates of changes in tree defoliation in French high forests. *Forest Ecology and management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.009>
- 5- Flot J.-L., Caroulle F., Lucas S., 2007. Dépérissement et mortalité : un éclairage de la situation en France. *L'IF*, n°16, 8 p.
- 6- Ponette, Q., Ulrich, E., Brêthes, A., Bonneau, M., Lanier, M., 1997. RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau, campagne de mesures 1993/95. Editeur : Office National des Forêts, Département des Recherches Techniques, ISBN 2 - 84207 - 100 - X, 427 p.
- 7- Jonard M., Caignet I., Ponette Q., Nicolas M., 2013 : Evolution du carbone des sols forestiers de France métropolitaine – Détection et quantification à partir des données mesurées sur le réseau RENECOFOR. Rapport final d'étude subventionnée par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 55 p + annexes de 304 p
- 8- Gis Sol, 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.
- 9- Badeau, V., 1998. Caractérisation écologique du réseau européen de suivi des dommages forestiers - Bilan des opérations de terrain et premiers résultats. Les cahiers du DSF, 5-1998, Min. Agri. Pêche, DERF, Paris, ISSN 1270-9417, 211 p.
- 10- Badeau, V., Rabastens, R., Nicolas, M., Ulrich, E., 2009. Changes in the chemical and/or physical forest soil condition. First results of Biosoil in France. The Biosoil project - Forest soil and biodiversity monitoring in the EU, Bruxelles, Belgique, 9 novembre 2009.
- 11- Ulrich E., Croisé L, Lanier A., Brêthes A., Cecchini S., 2009 : RENECOFOR - Manuel de référence n° 4 pour l'échantillonnage des sols et des litières en grappes et la préparation des échantillons, 3ème version. Editeur : Office National des Forêts, Direction Technique et Commerciale Bois, Département Recherche, 41 p.
- 12- De Vos B., Cools N. 2011. Second European Forest Soil Condition Report. Volume I: Results of the BioSoil Soil Survey. INBO.R.2011.35. Research Institute for Nature and Forest, Brussel. 359 p.
- 13- Schmidt MW, Torn MS, Abiven S, Dittmar T, Guggenberger G, Janssens IA, Kleber M, Kögel-Knabner I, Lehmann J, Manning DA, Nannipieri P, Rasse DP, Weiner S, Trumbore SE, 2011: Persistence of soil organic matter as an ecosystem property, *Nature*, 478: 49–56, doi:10.1038/nature10386

## LES INDICATEURS DE REPARTITION DES ORGANISMES

### FICHES PRESENTEES :

- OPTIMUM ALTITUDINAL DE PRESENCE DES ESPECES
- REPARTITION DES ESPECES THERMOPHILES
- REPARTITION DES ESPECES CONTINENTALES, ATLANTIQUES
- DETTE CLIMATIQUE (*décalage entre déplacement réel et attendu des espèces*)
- PRESENCE DE L'ENCRE A *PHYTOPHTHORA CINNAMOMI* SUR CHENE
- PRESENCE DE *DOTHISTROMA PINI* SUR PIN LARICIO
- EXPANSION DU FRONT DE LA CHENILLE PROCESSIONNAIRE DU PIN

**Avertissement :** les descriptions données dans ces fiches n'ont pas – par manque de temps – été modifiées après la réunion de restitution du projet, même quand cette dernière a conduit à nuancer ou modifier certaines appréciations qu'elles comportent. Ce travail devra être fait, le cas échéant, dans le prolongement du projet SICFOR.

## OPTIMUM ALTITUDINAL DE PRESENCE DES ESPECES

### Identification

Nom de l'expert référant	<b>Jonathan Lenoir</b>
Nom de l'indicateur	<b>Optimum altitudinal de présence des espèces (-1-)</b>
Unités de l'indicateur	Altitude au dessus du niveau de la mer en mètres (m)
Public ciblé	<b>Gestionnaires forestiers</b>
Espèces ciblées	Principales essences forestières
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Couverture <b>nationale</b>

### Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	Les bases de données floristiques <b>Sophy et Ecoplant</b> (-2- ; -3-)
Variables brutes utilisées	<b>Données géolocalisées</b> (latitude, longitude, altitude) de présence/absence de chaque essence forestière
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Mesures</b>
Protocole utilisé	Comparaison, pour chaque essence, de la distribution des populations adultes (représentatives du climat passé) versus la distribution des populations juvéniles (représentatives du climat récent) (-4-)
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	Massifs montagneux français
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	<b>Internationale</b> (Europe essentiellement)
Maille de résolution spatiale	Échantillonnage spatial non systématique
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	Méthode synchronique (adulte vs. juvénile)
Périodicité des mesures	<b>Une période unique</b>

### Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Traitement des données
Indicateur simple ou composite (indice)	Indicateur simple
Traitements appliqués aux données	Modélisation

### Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Suivi de la distribution altitudinale des espèces végétales au cycle de reproduction long</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Équilibre de la distribution des principales essences forestières avec le climat actuel
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>Température</b> pour l'essentiel

Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Corrélation
Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Usages du sol, traitements sylvicoles, perturbations naturelles et/ou anthropiques
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	Approvisionnement en biomasse ligneuse (production de bois) : enjeux de productivité des forêts de montagne mais aussi de support de lutte contre l'érosion des sols
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>Courbes de réponse</b> des essences à l'altitude

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Indicateur à <b>améliorer</b> avec une <b>évaluation de l'indicateur par massif montagneux</b>
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	National ou bien à l'échelle du massif montagneux si possible
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	<b>Sensibilité plus forte pour ce qui est de la comparaison entre populations adulte et juvénile</b> (cf. méthode synchronique) que par une approche plus directe, type diachronique, de comparaison entre deux périodes (cf. inertie naturelle des essences forestières et nécessité de travailler avec des données de très long terme, centaines d'années)
Précision de l'indicateur	
Robustesse, fragilité face aux biais	Robustesse <b>fonction de l'effort d'échantillonnage</b> et des <b>covariables disponibles pour corriger les biais</b> éventuels

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Disponible à l'échelle nationale pour 17 essences forestières</b> mais <b>utilisable uniquement au niveau national</b> . Son utilisation à l'échelle locale du massif montagneux nécessiterait une analyse plus approfondie des données (-4-)
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Données existantes</b> (cf. richesse des bases IFN, ancienne et nouvelle méthodes) mais <b>difficiles d'accès</b> (non libre ou accès limité : <b>données de géoréférencement souvent très très difficile à obtenir auprès de l'IFN</b> et au combien importante pour analyser proprement l'information). Ceci constitue un frein important pour la recherche.
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Manques	



## REPARTITION DES ESPECES THERMOPHILES

### Identification

Nom de l'expert référent	<b>Julie Pargade</b>
Nom de l'indicateur	<b>Répartition des espèces thermophiles</b>
Unités de l'indicateur	latitude en degré (-5- ; -6- ; -7-)
Public ciblé	<b>chercheurs, gestionnaires, naturalistes, décideurs</b>
Espèces ciblées	Espèces thermophiles dont la limite N est présente en France <i>(dont Espèces ayant une capacité de déplacement importante, espèces assez abondantes ou généralistes)</i>
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Couverture <b>nationale</b>

### Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	Base de données <b>ECOPLANT, SOPHY, IFN, RENECOFOR</b> ; au niveau régional : <b>OREF (NPC Picardie), observatoire pyrénéen</b>
Variables brutes utilisées	<b>Données géolocalisées</b> (latitude, longitude, altitude) de présence/absence de chaque espèce considérée
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Mesures</b>
Protocole utilisé	Comparaison, pour chaque espèce, de la distribution des populations entre plusieurs périodes d'inventaires
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	<b>Internationale</b> (Europe essentiellement) ou <b>nationale</b> pour certaines bases de données (IFN...)
Maille de résolution spatiale	Échantillonnage spatial non systématique ou systématique selon le réseau considéré
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	variable selon les bases de données
Périodicité des mesures	<b>variable</b> selon les bases de données IFN nouvelle méthode (2004) : annuel RENECOFOR : 5 ans

### Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Traitement des données
Indicateur simple ou composite (indice)	Indicateur simple
Traitements appliqués aux données	Modélisation pour limiter les biais liés à d'autres facteurs

## Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Constata-t-on un déplacement des espèces thermophiles vers le nord ?</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Révéléateur d'une évolution de la biodiversité forestière, d'une évolution des conditions de croissance des arbres
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>Température</b> pour l'essentiel
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Corrélation
Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Usages du sol, gestion forestière, perturbations naturelles et/ou anthropiques (eutrophisation, fragmentation des milieux...)
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	* <b>Courbes de réponse</b> des espèces thermophiles à la latitude * <b>carte de l'évolution de l'aire de répartition</b> des espèces thermophiles sélectionnées * Possibilité également de s'intéresser au <b>troisième quartile ou neuvième décile des présences le long du gradient de latitude</b> . Ensuite, on peut comparer la différence de position de cet indice entre deux voir plusieurs périodes d'inventaires et éventuellement corriger les effets liés aux fluctuations de taille de populations entre périodes d'inventaires (cf. refs). A noter que l'on peut aussi utiliser la longitude comme deuxième indicateur pour le gradient de continentalité. (-5-)

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	Nationale
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	<b>Sensibilité/ réactivité plus fortes</b> si on s'intéresse à <b>des espèces généralistes</b> ou relativement abondantes, espèces à la capacité de déplacement importante
Précision de l'indicateur	
Robustesse, fragilité face aux biais	Robustesse <b>fonction de l'effort d'échantillonnage</b> et des <b>covariables disponibles pour corriger les biais</b> éventuels

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Inventaires disponibles</b> (problème de la géolocalisation précise pour certaines données) <b>mais liste des espèces considérée à établir</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Données existantes</b> (cf. richesse des bases IFN, ancienne et nouvelle méthodes) mais <b>difficiles d'accès</b> (non libre ou accès limité : <b>données de géoréférencement souvent très très difficile à obtenir auprès de l'IFN</b> et au combien importante pour analyser proprement l'information). Ceci constitue un frein important pour la recherche.
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Remarques additionnelles	Afin d'éviter les phénomènes de compensation, il est très important <b>d'étudier et d'analyser les deux indicateurs</b> longitude et latitude : « Répartition des espèces continentales, atlantiques » et « Répartition des espèces thermophiles », <b>simultanément</b> . (-8-)

## REPARTITION DES ESPECES CONTINENTALES, ATLANTIQUES

### Identification

Nom de l'expert référant	<b>Julie Pargade</b>
Nom de l'indicateur	<b>Répartition des espèces continentales, atlantiques</b>
Unités de l'indicateur	longitude en degré (-5- ; -6- ; -7-)
Public ciblé	<b>chercheurs, gestionnaires, naturalistes, décideurs</b>
Espèces ciblées	Espèces thermophiles dont la limite N est présente en France <i>(dont Espèces ayant une capacité de déplacement importante, espèces assez abondantes ou généralistes)</i>
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Couverture <b>nationale</b>

### Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	Base de données <b>ECOPLANT, SOPHY, IFN, RENECOFOR ; anciens atlas botaniques,</b> au niveau régional : <b>OREF (NPC Picardie), observatoire pyrénéen, bases de données naturalistes locales</b>
Variables brutes utilisées	<b>Données géolocalisées</b> (latitude, longitude, altitude) de présence/absence de chaque espèce considérée
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Mesures</b>
Protocole utilisé	Comparaison, pour chaque espèce, de la distribution des populations entre plusieurs périodes d'inventaires
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	<b>Internationale</b> (Europe essentiellement) ou <b>nationale</b> pour certaines bases de données (IFN...)
Maille de résolution spatiale	Échantillonnage spatial non systématique ou systématique selon le réseau considéré
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	variable selon les bases de données
Périodicité des mesures	<b>variable</b> selon les bases de données IFN nouvelle méthode (2004) : annuel RENECOFOR : 5 ans

### Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Traitement des données
Indicateur simple ou composite (indice)	Indicateur simple
Traitements appliqués aux données	Modélisation pour limiter les biais liés à d'autres facteurs

### Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>Constate-t-on un déplacement des espèces océaniques vers l'Est ?</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Révéléateur d'une évolution de la biodiversité forestière, d'une évolution des conditions de croissance des arbres
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>Température</b> pour l'essentiel

Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Corrélation
Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Usages du sol, gestion forestière, perturbations naturelles et/ou anthropiques (eutrophisation, fragmentation des milieux...)
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<p>* <b>Courbes de réponse</b> des espèces continentales à la longitude</p> <p>* <b>carte de l'évolution de l'aire de répartition</b> des espèces continentales sélectionnées</p> <p>* Possibilité également de s'intéresser <b>au troisième quartile ou neuvième décile des présences le long du gradient de longitude</b>. Ensuite, on peut comparer la différence de position de cet indice entre deux voir plusieurs périodes d'inventaires et éventuellement corriger les effets liés aux fluctuations de taille de populations entre périodes d'inventaires (-5-)</p>

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	attention à la fiabilité des relevés pour les données IFN concernant des espèces peu présentes Sinon démarche qualité sur RENECOFOR
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	Nationale
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	<b>Sensibilité/ réactivité plus fortes</b> si on s'intéresse à <b>des espèces généralistes</b> ou relativement abondantes, espèces à la capacité de déplacement importante
Précision de l'indicateur	
Robustesse, fragilité face aux biais	Robustesse <b>fonction de l'effort d'échantillonnage</b> et des <b>covariables disponibles pour corriger les biais</b> éventuels

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Inventaires disponibles</b> (problème de la géolocalisation précise pour certaines données) <b>mais liste des espèces considérée à établir</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Données existantes</b> (cf. richesse des bases IFN, ancienne et nouvelle méthodes) mais <b>difficiles d'accès</b> (non libre ou accès limité : <b>données de géoréférencement souvent très très difficile à obtenir auprès de l'IFN</b> et au combien importante pour analyser proprement l'information). Ceci constitue un frein important pour la recherche.
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Remarques additionnelles	Afin d'éviter les phénomènes de compensation, il est très important <b>d'étudier et d'analyser les deux indicateurs</b> longitude et latitude : « Répartition des espèces continentales, atlantiques » et « Répartition des espèces thermophiles », <b>simultanément</b> . (-8-)

## DETTE CLIMATIQUE

### Identification

Nom de l'expert référent	Frédéric Archaux
Nom de l'indicateur	Dettes climatique (-9- ; -10-)
Unités de l'indicateur	Kilomètres (décalage entre le réchauffement et le changement de distribution observés). Ou possibilité de l'exprimer en degrés de température
Public ciblé	Grand public
Espèces ciblées	Oiseaux communs
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Couverture <b>nationale</b>

### Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	STOC-EPS et Météo France (-11-)
Variables brutes utilisées	Données d'abondance
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	<b>Mesures</b>
Protocole utilisé	Protocole STOC EPS par points d'écoute de 5 minutes, 2 passages annuels répétés chaque année sur les mêmes carrés de 4 km <sup>2</sup> avec 10 points par carré représentatifs des unités paysagères du carré (-11-)
Echelle géographique ciblée	<b>Nationale</b>
Représentativité spatiale	Nationale (mais surtout zones biogéographiques continentale et océanique)
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	<b>Internationale</b> (Europe essentiellement)
Maille de résolution spatiale	Échantillonnage spatial non systématique
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	<b>1989 mais surtout post-2000</b>
Périodicité des mesures	<b>Annuelle</b>

### Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Traitement des données (-9-)
Indicateur simple ou composite (indice)	Composite
Traitements appliqués aux données	Modélisation

### Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	<b>La faune et la flore parviennent-elle à adapter leur distribution aussi rapidement que le changement climatique?</b>
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Potentiellement bon fonctionnement des chaînes trophiques (oiseaux en bout des chaînes trophiques)
A quelles variables climatiques est-il relié ?	<b>Température</b> pour l'essentiel

Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Corrélation
Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Usages du sol, traitements agricoles et sylvicoles, perturbations naturelles et/ou anthropiques
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	Potentiellement service de <b>régulation des ravageurs</b> (insectivorie), service culturel
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>Carte nationale</b> de la dette d'extinction par interpolation des dettes locales (échelle du carré de 4 km <sup>2</sup> ). + Courbe (pente globale) de la variation du CTI en fonction du temps (augmentation du CTI en °C.an <sup>-1</sup> )

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Indicateur à améliorer avec une <b>évaluation de l'indicateur par massif montagneux</b>
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	<b>National</b>
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	Données issues de sciences participatives avec un fort impact sur le grand public
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	Forte (annuelle) (-12-)
Précision de l'indicateur	
Robustesse, fragilité face aux biais	Grande robustesse <b>grâce à l'effort d'échantillonnage important</b> et des <b>covariables disponibles</b> pour corriger les biais éventuels

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Oui</b> et en cours d'amélioration/automatisation
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	Données STOC et météorologiques existantes, <b>besoin d'organiser le calcul concomitant des indicateurs Community Thermal Index et T°C moyenne locale</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Manques	<b>Pas strictement forestier</b> sauf à sélectionner seulement des points en milieu forestier. <b>Seulement sur les oiseaux pour le moment en France.</b>
Remarques additionnelles	<b>Extension possible à la flore vasculaire de l'IGN</b> (-13-)

PRESENCE DE L'ENCRE A *PHYTOPHTHORA CINNAMOMI* SUR CHENE

### Identification

Nom de l'expert référent	Benoit Marçais
Nom de l'indicateur	Présence de l'encre à <i>Phytophthora cinnamomi</i> sur chêne
Unités de l'indicateur	Sans dimension
Public ciblé	Gestionnaires, scientifiques, grand public
Espèces ciblées	Phytophthora cinnamomi, Quercus sp
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Bonne

### Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	Département de la Santé des Forêt (DSF)
Variables brutes utilisées	Mention de maladie
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	enquête
Protocole utilisé	suivi de routine du DSF
Echelle géographique ciblée	Nationale
Représentativité spatiale	Environ 550 sites répartis sur maillage systématique 16 km x 16 km sur toute la métropole, et observations « opportunistes »
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Non
Maille de résolution spatiale	Environ 550 sites répartis sur maillage systématique 16 km x 16 km sur toute la métropole
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	1989
Périodicité des mesures	Annuelle

### Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Traitement des données
Indicateur simple ou composite (indice)	indicateur simple (taux de mention)
Traitements appliqués aux données	estimateurs à noyaux

### Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	La présence de chancre à <i>P. cinnamomi</i> sur chêne s'observe-t-elle plus au nord que dans le passé ? (-14- ; -15-)
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Agent pathogène forestier majeur
A quelles variables climatiques est-il relié ?	Températures hivernales (-16- ; -17 - ; -18-)
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Meilleure survie les hivers doux (-16- ; -17 - ; -18-)

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Dispersion via la plantation de matériel contaminé
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	oui, approvisionnement en bois
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>Carte nationale</b>

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	Suivi de routine déjà mis en place de façon pérenne; temps de réponse lent
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	Mal connu, mais à priori <b>assez lent</b>
Précision de l'indicateur	Dépend de l' <b>effort d'échantillonnage</b>
Robustesse, fragilité face aux biais	Devrait être <b>assez robuste</b> si l'effort d'échantillonnage du DSF se maintient à son niveau actuel

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Non</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Calcul, diffusion de l'indicateur</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Manques	.
Remarques additionnelles	



PRESENCE DE *DOTHISTROMA PINI* SUR PIN LARICIO

### Identification

Nom de l'expert référant	Benoit Marçais
Nom de l'indicateur	Présence de <i>Dothistroma pini</i> sur Pin laricio
Unités de l'indicateur	sans dimension
Public ciblé	Gestionnaires, scientifiques, grand public
Espèces ciblées	<i>Dothistroma pini</i> , <i>Pinus nigra</i> subsp laricio
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	Bonne à l'ouest, mauvaise dans la moitié est de la France

### Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	Département de la Santé des Forêt (DSF)
Variables brutes utilisées	Mention de maladie
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	Enquête et réseau
Protocole utilisé	Suivi de routine du DSF
Echelle géographique ciblée	Moitié Ouest France
Représentativité spatiale	Lié aux placettes pin laricio du réseau de suivi de la processionnaire du pin, complété par des sites complémentaires dans les régions où le pin laricio est absent
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Non
Maille de résolution spatiale	Environ 200 observations annuelles
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	2009
Périodicité des mesures	Annuelle

### Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Traitement des données
Indicateur simple ou composite (indice)	indicateur simple (taux de mention)
Traitements appliqués aux données	estimateurs à noyaux

### Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	La présence de <i>Dothitroma pini</i> sur pins laricio s'obesrve-t-elle plus au nord que dans le passé ? (-19- ; -20-)
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	Agent pathogène forestier majeur
A quelles variables climatiques est-il relié ?	Température estivale, pluviométrie estivale (-19- ; -20-)
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Plus fort taux de multiplication les été chauds et humides
Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche

A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Dispersion via la plantation de matériel contaminé
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	oui, approvisionnement en bois
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>Carte</b>

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	Suivi de routine déjà mis en place de façon pérenne; nécessite un diagnostic PCR via L'ANSES
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	A priori assez rapide (dispersion aérienne de l'agent)
Précision de l'indicateur	Dépend de l' <b>effort d'échantillonnage</b>
Robustesse, fragilité face aux biais	Devrait être <b>assez robuste</b> si l'effort d'échantillonnage du DSF se maintient à son niveau actuel

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Non</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Calcul, diffusion de l'indicateur</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	
Manques	.
Remarques additionnelles	

## FRONT D'EXPANSION DE LA CHENILLE PROCESSIONNAIRE DU PIN

### Identification

Nom de l'expert référant	Alain Roques et Christelle Robinet
Nom de l'indicateur	Expansion du front de la processionnaire du pin
Unités de l'indicateur	Km/an
Public ciblé	Gestionnaire forestiers, collectivités locales (plantations ornementales)
Espèces ciblées	Conifères (pins essentiellement)
Représentativité de ces espèces à l'échelle nationale	couverture nationale

### Données et échelles

Sources des données (réseau et nom du détenteur de la donnée)	Base de données Inra Zoologie Forestière Orléans
Variables brutes utilisées	Données géolocalisées (latitude, longitude, altitude) de présence de colonies de chenilles
Nature (Mesures, enquête, analyse bibliographique)	Enquête
Protocole utilisé	Relevé de présence/ absence en suivant toutes les routes carrossables sur une grille de maille 8*8 km sur l'ensemble de la France et relevé exhaustifs des nids de front dans la région parisienne et le Briançonnais
Echelle géographique ciblée	2 niveaux: a- Front nord global de la Bretagne au Jura; b- front détaillé en région parisienne et dans le Briançonnais
Représentativité spatiale	latitude et altitude
Est-il suivi à l'échelle européenne et/ou internationale (pays) ?	Suivi identique sur l'ensemble du bassin méditerranéen mais sur une grille de maille 16*16 km (projet PCLIM)
Maille de résolution spatiale	8 km
Longueur des séries temporelles (date de début d'acquisition)	1980 - 2002: relevés annuels grossiers; puis 2005-2006: relevé sur maille ci-dessus
Périodicité des mesures	5 ans sur le front global, 2 ans sur la région parisienne et le Briançonnais

### Méthode de calcul

Acquisition du résultat (direct ou traitement de données)	Direct
Indicateur simple ou composite (indice)	Simple
Traitements appliqués aux données	Modélisation

### Signification

A quelle question l'indicateur se propose de répondre ?	Préciser la vitesse actuelle de progression de l'insecte pour pouvoir modéliser son expansion future
Que représente cet indicateur en terme de fonctionnement des forêts ?	L'insecte est le principal ravageur des pinèdes
A quelles variables climatiques est-il relié ?	Températures, hivernales essentiellement
Quel type de relation existe-t-il entre la valeur prise par l'indicateur et le changement climatique : corrélation, causalité, directe ou indirecte ?	Directe: la hausse des températures hivernales lève les barrières à l'expansion en permettant la survie et le développement des colonies (-21-)

Comment cette relation a-t-elle été établie : recherche, dire d'expert, opinion publique, autre ?	Recherche (-22-)
A quels facteurs autres que climatiques est-il relié ?	Transport accidentel par l'Homme au-delà du front via la plantation de grands arbres (-23-)
Est-il lié à un service écosystémique : d'approvisionnement, de régulation, de support, culturel et social, autre, non relié ?	La pénétration de la processionnaire sur les plantations isolées dans les zones urbaines est une menace sanitaire pour l'Homme et les animaux domestiques (urtication) (-24-)
Sous quelle forme cet indicateur peut-il être présenté : courbes, cartes, tableau... ?	<b>Carte</b>

## Validité

Fiabilité des données et démarche qualité	Les relevés sont confrontés aux observations effectuées par les partenaires forestiers et les collectivités locales
Conditions de validité de l'indicateur, domaine d'application	National, santé des forêts, santé humaine et animale
Réserves et avantages scientifiques actuels concernant les données, les protocoles et l'indicateur	Les caractéristiques visuelles des colonies (nids blancs de taille appréciable) rendent les relevés aisés à réaliser, même par des non-spécialistes. Cependant, à la différence de la fin des années 1990, l'insecte progresse désormais significativement moins vite que l'enveloppe climatique favorable. Il conviendrait donc de <b>transformer cet indicateur sous la forme de l'évolution temporelle de l'aire potentiellement colonisable par la processionnaire en France et en Europe sous l'influence du changement climatique.</b> (-25-)
Référenciation scientifique globale de l'indicateur (nulle/faible/moyenne/forte)	<b>Forte</b>
Sensibilité/réactivité de l'indicateur	Problématique, cf ci-dessus
Précision de l'indicateur	cf ci-dessus
Robustesse, fragilité face aux biais	Le délai entre les relevés permet de limiter les variations stochastiques liées aux conditions climatiques particulières d'une année.

## Limites et perspectives

L'indicateur est-il déjà disponible ?	<b>Oui, mais évolutif</b>
A quel niveau se situe le verrou pour rendre accessible l'indicateur (besoin de recherche, besoin de collecte de données, besoin d'organisation et de diffusion de la donnée) ?	<b>Besoin de collectes de données</b>
Moyens techniques et/ou financiers nécessaires pour développer l'indicateur	Chaque relevé tous les 5 ans nécessite 2 techniciens à plein temps sur 3 mois d'hiver et chaque relevé bisannuel un mois de technicien plein temps
Manques	.Compréhension des effets éventuellement contradictoires des événements extrêmes (-26-)
Remarques additionnelles	

## Références – Répartition des organismes

- 1- Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A., de Ruffray P., Brisse H., (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320, 1768-1771.
- 2- Brisse H., de Ruffray P., Grandjouan G., Hoff M., 1995. European vegetation survey. The phytosociological database "Sophy". Part 1. Calibration of indicator plants. Part 2. Socio-ecological classification of the relevés. *Annals of Botany.*, 53, 177-223.
- 3- Gégout J. C., Condon C., Bailly G., Jabiol B., 2005. EcoPlant: a forest site database linking floristic data with soil and climate variables. *Journal of Vegetation Science*, 16, 257-260.

- 4- Lenoir J., Gégout J.C., Pierrat J.C., Bontemps J.D., Dhôte J.F., (2009). Differences between tree species seedling and adult altitudinal distribution in mountain forests during the recent warm period (1986-2006). *Ecography*, 32, 765-777
- 5- Thomas C.D. & Lennon J.J. 1999. Birds extend their ranges northwards. *Nature*, 399, 213
- 6- Brommer J.E., Lehtikoinen A., Valkama J., (2012). The Breeding Ranges of Central European and Arctic Bird Species Move Poleward. *PLoS ONE*, 7, e43648
- 7- Kujala H., Vepsäläinen V., Zuckerman B., Brommer J.E., (2012). Range margin shifts of birds revisited: the role of spatiotemporally varying survey effort, *Global Change Biology*, 19, 420–430
- 8- Pinsky M.L., Xorin B., Fogarty M.J., Sarmiento J.L., Levin S.A., 2013. Marine taxa track local climate velocities. *Science*, vol. 341, pp. 1239-1242
- 9- Devictor V., Julliard R., Jiguet F., Couvet D., 2008. Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 275, 2743-2748
- 10- Devictor V., van Swaay C., Brereton T., Brotons L., Chamberlain D., *et al.*, 2012. Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Climate Change*, 2,121-124
- 11- Julliard R. & Jiguet F., 2002. Un suivi intégré des populations d'oiseaux communs en France. *Alauda*, 70(1), 137-147
- 12- Julliard R., Jiguet F., Couvet D., 2004. Evidence for the impact of global warming on the long-term population dynamics of common birds. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 271(Suppl 6), S490-S492
- 13- Bertrand R., Lenoir J., Piedallu C., Riofrio-Dillo G., de Ruffray P., Vidal C., Pierrat J.-C., Gégout J.-C., 2011. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, vol. 479, 517-520
- 14- Bergot M., Cloppet E., Pérarnaud V., Déqué M., Marçais B., Desprez-Loustau M.L., (2004). Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biology*, 10, 1539-1552
- 15- Brasier C.M. & Scott J.K., 1994. European oak declines and global warming : a theoretical assessment with special reference to the activity of *Phytophthora cinnamomi*. *EPPO Bulletin*, 24, 221-232
- 16- Benson D.M., 1982. Cold inactivation of *Phytophthora cinnamomi*. *Phytopathology*, 72, 560-563
- 17- Marçais B., Dupuis F., Desprez-Loustau M.L., 1996. Modelling the influence of winter frosts on the development of the stem canker of red oak, caused by *Phytophthora cinnamomi*. *Annals of Forest Science*, 53, 369-382
- 18- Marçais B., Bergot M., Pérarnaud V., Levy A., Desprez-Loustau M.L., 2004. Prediction and mapping of the impact of winter temperatures on the development of *P. cinnamomi* induced cankers on red and pedunculate oak. *Phytopathology*, 94, 826-831
- 19- Woods A., Coates K.D., Hamann A., 2005. Is an unprecedented Dothistroma needle blight epidemic related to climate change? *Bioscience*, 55, 761-769
- 20- Fabre B., Loos R., Piou D., Marçais B., (2012). Is the Emergence of Dothistroma Needle Blight of Pine in France caused by the Cryptic Species *Dothistroma pini* ? *Phytopathology*, 102, 47-54
- 21- Battisti A., Stastny M., Netherer S., Robinet C., Schopf A., Roques A., Larsson S., 2005. Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 15(6), 2084–2096
- 22- Robinet C., Baier P., Pennerstorfer J., Schopf A., Roques A., 2007. Modelling the effects of climate change on the potential feeding activity of *Thaumetopoea pityocampa* (Den. & Schiff.) (Lep.,Notodontidae) in France. *Global Ecology and Biogeography*, 16 , 460-471
- 23- Robinet C., Imbert C.E., Rousset J., Sauvard D., Garcia J., Goussard F., Roques A., 2012. Warming up combined with the trade of large trees allowed long-distance jumps of pine processionary moth in Europe. *Biological Invasions*, 14, 1557–1569
- 24- Vega JM, Moneo I, García Ortiz JC, Sánchez Palla P, Sanchís ME, Vega J, Gonzalez-Muñoz M, Battisti A, Roques A, 2011. Prevalence of cutaneous reactions to pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*) in an adult population. *Contact Dermatitis*, 64, 220–228.
- 25- Robinet C., Rousset J., Roques A., 2013. Potential spread of the pine processionary moth in France: preliminary results from a simulation model and future challenges. *Annals of Forest Science*, DOI 10.1007/s13595-013-0287-7
- 26- Robinet C., Rousset J., Pineau P; Miard F., Roques A., 2013. Are heat waves susceptible to mitigate the expansion of a species progressing with global warming? *Ecology and Evolution*, doi: 10.1002/ece3.690

## LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

- ACCAF** : Méta programme « Adaptation au Changement Climatique de l’Agriculture et de la Forêt » de l’INRA
- AEE** : Agence européenne de l’environnement
- ANR** : Agence nationale de la recherche
- CNRS** : Centre national de la recherche scientifique
- CRPF** : Centres régionaux de la propriété forestière (regroupés au sein du Centre national de la propriété forestière)
- DPSIR** : Déterminants - Pressions - Etat - Impacts- Réponses (modèle conceptuel)
- DSF** : Département de la santé des forêts (Ministère de l’agriculture)
- EFI** : European Forest Institute
- EPA** : Environmental Protection Agency
- GICC** : Gestion et Impacts du Changement Climatique (MEDDE)
- ICP Forests** : International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. En français : PIC Forêts, Programme international concerté sur l’évaluation et la surveillance des effets de la pollution atmosphérique sur les forêts (Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, Commission économique pour l’Europe des Nations-Unies).
- IDF** : Institut pour le Développement Forestier (regroupés avec les CRPF au sein du CNPF)
- IFN** : Inventaire forestier national (intégré à l’IGN depuis fin 2011)
- IGD Forêts** : Indicateurs de gestion durable des forêts
- IGN** : Institut national de l’information géographique et forestière
- Inra** : Institut national de la recherche agronomique
- Irstea** : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l’environnement et l’agriculture (Cemagref antérieurement)
- MAAF** : ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt.
- MEDDE** : ministère de l’écologie du développement durable et de l’énergie
- ONB** : Observatoire National de la Biodiversité (MEDDE)
- ONCFS** : Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage
- ONERC** : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
- ONF** : Office national des forêts
- PER** : « Pressions – État – Réponses » (modèle conceptuel)
- PNACC** : Plan National d’Adaptation au Changement Climatique
- RENECOFOR** : Réseau national de suivi à long terme des écosystèmes forestiers)
- RESOFOP** : RESeau d’Observation économique de la FORêt Privée
- RMQS** : Réseau de mesures de la Qualité des SOLS
- RSSDF** : Réseau Systématique de Suivi des dommages Forestiers (maille 16 x 16 km)
- SIP-GECC** : Système d’Information Phénologique pour la Gestion et l’Etude des Changements Climatiques