

A photograph of a large white cylindrical component of a space station in orbit above the Earth. The component has various panels and a robotic arm extending from it. The Earth's surface is visible below, showing clouds and a blue horizon. A teal rectangular frame is overlaid on the right side of the image.

JUILLET 2022

**MÉTÉOROLOGIE  
ET OBSERVATION  
TERRESTRE**

# OAT verte

## Subventions publiques aux activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre

### Rapport final

#### Équipe d'évaluation :

Dorian Pinsault, Julie de Brux et Damien Bescheron

CITIZING

Avec la participation de Michel Jarraud, ancien secrétaire général de  
l'Organisation météorologique mondiale

Mars 2022

1

Rapport final – 2022

## Table des matières

Synthèse .....	6
Introduction.....	11
Les organisations et leurs activités respectives .....	13
L'Agence spatiale européenne (ESA).....	14
Le Centre national d'études spatiales (CNES) .....	16
L'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT).....	17
Le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) .....	18
Météo-France .....	20
Scénario contrefactuel .....	22
Aucune subvention accordée aux organisations météorologiques .....	22
Aucune subvention pour les activités d'observation de la Terre .....	23
Un scénario contrefactuel purement théorique .....	24
Méthode générale.....	26
Difficultés de l'évaluation.....	29
Vue d'ensemble.....	30
Impacts environnementaux des activités météorologiques et d'observation de la Terre .....	31
1. Agriculture et sylviculture .....	31
A. Optimisation des traitements agricoles .....	31
B. Prévention et contrôle des feux de forêt et de leurs conséquences .....	38
C. Gestion des espaces forestiers, agricoles et montagnards et de leurs écosystèmes .....	45
2. Production d'énergie.....	53
A. Développement des énergies solaire et éolienne .....	53
B. Réduction des erreurs de prévision de la production d'énergies éolienne et solaire, donc des ajustements nécessaires entre l'offre et la demande .....	56
C. Autres sources d'énergie .....	59
3. Zones maritimes et autres zones aquatiques.....	62
A. Optimisation du routage des navires pour le transport maritime .....	62
B. Gestion des marées noires .....	67
C. Gestion des zones maritimes et autres zones aquatiques .....	71
4. Zones urbaines .....	80
A. Canicules et îlots de chaleur urbains .....	80
B. Pollution atmosphérique urbaine .....	83
5. Recherche dans les domaines du climat et de l'environnement .....	88
A. Recherches utilisant des données d'observation de la Terre.....	88

B. Les organisations météorologiques, actrices de la recherche climatologique et utilisatrices de données d'observation de la Terre.....	92
6. Impacts directs des organisations .....	93
Analyse des activités météorologiques et d'observation de la Terre au regard de la taxinomie de l'UE.....	96
A. Activités météorologiques.....	97
B. Activités d'observation de la Terre.....	102
Conclusion générale .....	105
Personnes ayant participé aux entretiens – remerciements .....	108
Références bibliographiques .....	109
Annexes .....	114
A. Liste des impacts identifiés des activités météorologiques et d'observation de la Terre .....	114
B. Méthode de notation employée pour la sélection des impacts des activités de prévision météorologique .....	123
C. Méthodes utilisées pour quantifier les impacts .....	129
D. Projets récents et à venir auxquels participe le CNES (recherche dans le domaine de l'environnement) 136	
E. Exemple d'analyse d'une activité de Météo-France au regard des critères de la taxinomie de l'UE en matière d'adaptation.....	139
F. Extrait pertinent du règlement sur la taxinomie.....	141

## Figures

Figure 1 : dépenses adossées à l'OAT verte .....	11
Figure 2 : Les interactions entre les cinq organisations .....	13
Figure 3 : Les missions Sentinel .....	15
Figure 4 : Les orbites géostationnaire et polaire .....	17
Figure 5 : Le modèle global du CEPMMT .....	19
Figure 6 : La résolution du modèle global de Météo-France .....	20
Figure 7 : La chaîne de valeur des prévisions météorologiques .....	29
Figure 8 : La chaîne de valeur de l'observation de la Terre .....	29
Figure 1 : Plateforme BELCAM pour les agriculteurs .....	37
Figure 2 : Exemple de carte d'indice de nutrition azotée .....	37
Figure 11 : Évolution des incendies de forêt en France sur 15 ans .....	39
Figure 12 : exemples de cartes d'étendue des surfaces brûlées et de gradation des dommages des incendies produites par le Service de gestion des urgences de Copernicus .....	43
Figure 13 : Principales utilisations des sols en Europe, par type d'utilisation (2018) .....	46
Figure 14 : Occupation des sols d'après les données de Sentinel-2 .....	48
Figure 15 : Indice de végétation par différence normalisé de la canopée .....	50
Figure 6 : Détection des maladies des arbres (Portugal) .....	52
Figure 17 : Évolution des subventions publiques accordées aux énergies renouvelables en France (en millions d'euros) .....	53
Figure 18 : Volumes ajustés à la hausse et à la baisse sur le réseau d'électricité français .....	57
Figure 19 : Circuits d'eau dans une centrale nucléaire .....	60
Figure 20 : Positions des navires, obtenues par satellite le 20 octobre 2021 aux environs de 11 heures .....	62
Figure 21 : Grandes routes maritimes .....	63
Figure 22 : Limites des zones météorologiques (METAREAS) .....	65
Figure 23 : Zones couvertes par Météo-France .....	66
Figure 24 : Simulation de dérive de la nappe de pétrole de l'Erika au moyen du modèle MOTHY .....	70
Figure 25 : Évolution de l'indice d'étendue des zones humides (Wetlands Extent Index) dans les différentes régions du monde .....	72
Figure 26 : Exemples d'indicateurs fournis par SWOS .....	74
Figure 27 : Érosion d'une plage à New York, 2012 .....	77
Figure 28 : Produits du projet Coastal Erosion Project pour une côte anglaise .....	78
Figure 29 : Détection et analyse de l'évolution du trait de côte (de 2013 à 2015) sur une plage française .....	79
Figure 30 : Représentation visuelle d'un îlot de chaleur urbain .....	81
Figure 31 : Évolution des émissions de polluants en France métropolitaine (en indice base 100) .....	84
Figure 32 : Dispositif de gestion des épisodes de pollution de l'air .....	85
Figure 33 : Moyenne annuelle des concentrations de PM2.5 en France en 2019 .....	86
Figure 34 : Moyenne annuelle des concentrations de PM2.5 en France en 2009 .....	86
Figure 36 : Exemples de missions d'exploration de la Terre .....	88
Figure 35 : Futures missions d'exploration de la Terre .....	88
Figure 37 : Chaîne des impacts obtenus grâce à la recherche .....	89
Figure 38 : Proportion d'articles fondés sur des données d'observation de la Terre parmi l'ensemble des articles ayant trait au domaine de l'environnement (seuls les articles auxquels des membres de l'ESA ont contribué sont pris en compte) .....	90
Figure 39 : Domaines couverts par les publications fondées sur des données d'observation de la Terre .....	91

## Tableaux

Tableau 1 : Liste des impacts sur l'environnement et vue d'ensemble des analyses quantitatives et qualitatives .....	30
Tableau 2 : Résumé des impacts sur la réduction des émissions.....	34
Tableau 3 : Résumé des impacts sur la biodiversité.....	35
Tableau 3 : Test de sensibilité et fourchette de valeurs estimées de l'impact des prévisions météorologiques sur les émissions dues aux incendies de forêt.....	41
Tableau 5 : Classification des activités de prévision météorologique et de projection climatique .....	97

## Liste des acronymes

AEE	Agence européenne pour l'environnement
CE	Commission européenne
CEPMET	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
CNES	Centre national d'études spatiales
EDF	Électricité de France
ESA	Agence spatiale européenne
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Agence spatiale américaine)
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Agence américaine pour les océans et l'atmosphère)
OAT	Obligation assimilable du Trésor
OMM	Organisation météorologique mondiale
RTE	Réseau de transport d'électricité
SMN	Service météorologique national
UE	Union européenne

## Synthèse

### **Contexte**

Le rapport évalue l'impact environnemental des activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre conduites par Météo-France, par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), par l'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT), par l'Agence spatiale européenne (ESA) et par le Centre national d'études spatiales (CNES). Ces cinq organisations sont en partie financées par des dépenses publiques françaises adossées à l'OAT verte émise en 2017 par l'Agence France Trésor. L'évaluation s'appuie sur les quatre objectifs environnementaux définis dans le document-cadre de l'OAT verte : atténuation du changement climatique, adaptation au changement climatique, protection de la biodiversité et réduction de la pollution.

Le scénario contrefactuel repose sur le raisonnement suivant : à l'échelon national, les subventions publiques allouées à Météo-France et au CNES sont les principales sources de financement de ces deux organisations. Sans ces subventions versées depuis des décennies, ces organisations n'auraient pas pu conduire leurs activités. À l'échelon européen, les subventions versées par la France financent les contributions annuelles du pays à l'ESA, à EUMETSAT et au CEPMMT. Sans ces contributions versées depuis des décennies, et donc également sans les connaissances techniques et scientifiques de la France, la qualité des services fournis par les organisations météorologiques européennes serait moindre et l'observation terrestre n'aurait pas atteint son niveau de développement actuel. Par conséquent, le scénario contrefactuel repose sur deux hypothèses : i) nous postulons qu'il n'existe pas d'activités de prévision météorologique et climatique en France et que les services de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, l'agence américaine pour les océans et l'atmosphère) sont utilisés à la place, et ii) nous postulons que l'observation de la Terre en est encore à ses débuts en Europe, avec quelques missions d'exploration mais sans le programme Copernicus qui a des applications opérationnelles.

La méthode employée consiste à identifier les impacts environnementaux à partir d'entretiens menés avec des représentants des organisations subventionnées, de la littérature spécialisée et de l'expertise de Michel Jarraud<sup>1</sup> en matière de prévisions météorologiques. Étant donné le nombre important d'impacts identifiés, nous avons mis au point une stratégie pour les classer par ordre d'importance, afin de garantir une analyse approfondie des impacts prioritaires. Lorsque c'est possible, les impacts sont quantifiés à l'aide de modèles reposant sur des hypothèses afin de fournir des ordres de grandeur, la sensibilité des hypothèses étant indiquée par une fourchette de valeurs estimées, plutôt qu'une valeur unique. Lorsque l'incertitude est trop importante, comme c'est le cas pour l'observation de la Terre qui contribue de manière très indirecte aux impacts environnementaux, nous présentons des analyses qualitatives. Enfin, il nous faut préciser que la portée de l'étude est limitée, pour les activités de prévision météorologique, aux zones surveillées par Météo-France (à savoir la France et certaines zones internationales comme la partie occidentale de l'Océan indien), tandis qu'elle concerne plus largement l'Europe et le reste de la planète pour les activités d'observation de la Terre.

### **Principaux résultats**

Nous pouvons conclure que les activités météorologiques et d'observation de la Terre analysées dans cette évaluation ont des effets positifs sur :

- ❖ **L'atténuation du changement climatique**
  - en ce qui concerne les prévisions météorologiques :

---

<sup>1</sup> Michel Jarraud a été le secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) de 2004 à 2015. Spécialiste en prévision numérique du temps, il a occupé des postes opérationnels de haut niveau chez Météo-France et au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) avant de rejoindre l'OMM.

- celles-ci sont largement utilisées par les agriculteurs pour optimiser l'épandage des produits phytopharmaceutiques et des engrais. L'optimisation permet de limiter les déperditions de produits dans la nature en raison de conditions pluvieuses ou venteuses non anticipées et d'éviter la surutilisation de produits pour assurer une efficacité constante, ce qui aurait pour effet d'accroître les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à la fabrication et à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et des engrais. Selon les hypothèses retenues, **les prévisions météorologiques établies par Météo-France (avec l'appui du CEPMMT et d'EUMETSAT) auraient permis d'éviter chaque année des émissions comprises entre 746 et 3 672 kt éq. CO<sub>2</sub> dans le scénario le plus pessimiste ou entre 3 706 et 18 307 kt éq. CO<sub>2</sub> dans le scénario le plus optimiste** (qui repose également sur une hypothèse prudente), par rapport au scénario contrefactuel ;
- les prévisions météorologiques sont fondamentales pour soutenir l'action de la Sécurité civile dans le domaine de la prévention et du contrôle des feux de forêt, qui contribuent fortement à l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Nous estimons que **les services de prévision météorologique fournis par Météo-France pourraient avoir empêché l'incendie de 23 000 à 41 000 hectares de forêts chaque année, évitant ainsi des émissions de CO<sub>2</sub> comprises entre 1 084 et 1 952 kt éq. CO<sub>2</sub> par an** par rapport au scénario contrefactuel ;
- les énergies renouvelables éolienne et solaire dépendent des conditions météorologiques et n'auraient pas pu connaître un tel développement sans les services de prévision météorologique offerts par Météo-France et le CEPMMT, ce qui aurait limité leur pénétration sur le marché et favorisé des sources de production d'électricité davantage émettrices de GES. De plus, sans les données de Météo-France et du CEPMMT, davantage d'erreurs auraient été commises dans l'anticipation de la production des fermes solaires et des parcs éoliens, ce qui aurait nécessité des ajustements à la hausse plus fréquents (pour répondre à la demande) de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles, tant nationaux et qu'étrangers. **La qualité des prévisions météorologiques permettant d'anticiper la production d'énergie éolienne a permis de limiter ces situations et empêché l'émission en 2019 d'un volume supplémentaire de GES compris entre 18 000 et 40 000 t éq. CO<sub>2</sub> par rapport au scénario contrefactuel ;**
- les prévisions météorologiques contribuent à l'optimisation du routage des navires en leur fournissant des informations sur les conditions de navigation, ce qui leur permet d'économiser du temps et du carburant de manière substantielle et de réduire leurs émissions de GES par rapport à celles qui seraient produites avec des routes non optimisées. **Pour fournir un ordre de grandeur et une limite inférieure, nous estimons qu'en 2018, Météo-France a contribué à éviter entre 1,5 et 3 Mt éq. CO<sub>2</sub> d'émissions (soit 0,2 à 0,4 % du total des émissions liées au transport maritime) en aidant les navires à optimiser leurs routes dans les zones maritimes que l'organisation surveille ;**
- en ce qui concerne l'observation de la Terre :
  - l'observation de la Terre effectuée dans le cadre du programme européen Copernicus (missions Sentinel) contribue aussi à l'optimisation du traitement des cultures en fournissant des données destinées aux services d'agriculture de précision. Ces services aident les agriculteurs à épandre les traitements uniquement sur les parcelles qui en ont besoin, ce qui réduit les volumes de produit utilisés ;
  - l'observation terrestre joue également un rôle prometteur en matière de détection rapide et de cartographie des incendies, contribuant ainsi à limiter les zones brûlées et les émissions de CO<sub>2</sub> ;
  - elle constitue une source d'informations essentielle pour aider les pouvoirs publics à mettre en place une gestion et une protection plus efficaces des zones humides, qui



requièrent une surveillance sur de grandes superficies, parfois difficiles d'accès. L'observation terrestre est de plus en plus utilisée par les pouvoirs publics et les agences environnementales pour la mise en œuvre de mesures appropriées de protection et de restauration des zones humides, lesquelles jouent un rôle particulièrement important dans la séquestration du carbone ;

#### ❖ **L'adaptation au changement climatique**

- en ce qui concerne les prévisions météorologiques :
  - Météo-France fournit des projections sur l'évolution du climat à l'échelon local et des services climatiques spécifiques, tels que des prévisions sur l'évolution du risque incendie de forêt en France ou des évaluations de l'efficacité de projets locaux destinés à lutter contre les îlots de chaleur urbains. Ces prévisions sont déterminantes pour permettre aux pouvoirs publics de prendre des mesures appropriées d'atténuation des risques liés au changement climatique et rendre les territoires plus résilients face au réchauffement climatique et à la multiplication des canicules ;
- en ce qui concerne l'observation de la Terre :
  - la détection et la surveillance de l'érosion côtière au fil du temps représente une information essentielle pour permettre aux responsables et décideurs politiques à l'échelon local, régional et national de prendre des mesures d'adaptation au changement climatique optimales, et en particulier de rendre les territoires plus résilients face à l'élévation du niveau des mers et à la hausse des risques d'inondation. Par le biais du programme Copernicus, l'observation terrestre contribue de manière significative à l'amélioration de la surveillance de l'érosion côtière ;

#### ❖ **La protection de la biodiversité**

- en ce qui concerne les prévisions météorologiques :
  - les prévisions météorologiques de terrain fournies par Météo-France permettent de limiter les déperditions d'engrais agricoles dans la nature (en raison par exemple de conditions pluvieuses ou venteuses non anticipées avant l'épandage), réduisant ainsi le risque d'eutrophisation des eaux et protégeant la biodiversité aquatique de l'asphyxie. Nous estimons que chaque année, **ces prévisions permettent d'empêcher la disparition de toutes les espèces vivantes dans 11 à 54 km<sup>3</sup> d'eaux (eaux douces de surface, bande côtière, eaux souterraines)**, par rapport au scénario contrefactuel ;
  - les services offerts par Météo-France permettent de limiter les conséquences des feux de forêt et des marées noires sur la biodiversité en fournissant des prévisions qui aident les autorités à prendre rapidement les mesures les plus pertinentes ;
  - les prévisions météorologiques locales et fiables établies par Météo-France jouent un rôle déterminant dans la sécurité des barrages et des centrales nucléaires, en permettant de prévenir les accidents susceptibles d'avoir des conséquences désastreuses sur la biodiversité environnante ;
- en ce qui concerne l'observation de la Terre :
  - comme indiqué plus haut, l'observation de la Terre contribue également à l'optimisation des traitements agricoles pour permettre le développement de services d'agriculture de précision, limitant ainsi la surutilisation des produits phytopharmaceutiques et diminuant le risque d'eutrophisation ;
  - le programme Copernicus fournit des données permettant la détection rapide des feux de forêt et l'élaboration de cartes d'évaluation des dommages qui sont essentielles pour aider

les agents forestiers à identifier les zones touchées et prendre les mesures les plus appropriées pour restaurer l'environnement ;

- l'observation terrestre est également prometteuse en matière de surveillance de l'utilisation des sols et de l'état des forêts, des zones humides et des régions côtières. Cette surveillance est fondamentale pour détecter et cartographier, avec le haut degré de précision permis par les satellites du programme Copernicus, les perturbations d'origine anthropique ou naturelle subies par les écosystèmes et la biodiversité, de sorte que les autorités compétentes et les agences environnementales puissent prendre des mesures de protection et de restauration appropriées ;

#### ❖ La réduction de la pollution

- en ce qui concerne les prévisions météorologiques :
  - l'optimisation des traitements agricoles, du contrôle des incendies et des mesures d'intervention contre les marées noires, ainsi que la surveillance de la pollution atmosphérique, permises par Météo-France avec l'appui du CEPMMT et d'EUMETSAT, contribuent à diminuer la pollution de l'air, des sols et de l'eau par rapport au scénario contrefactuel ;
- en ce qui concerne l'observation de la Terre :
  - l'observation de la Terre contribue également à l'optimisation des traitements agricoles et du contrôle des incendies, comme indiqué plus haut, réduisant ainsi la pollution de l'eau, de l'air et des sols. Les données satellitaires sont utilisées pour la détection et le suivi des marées noires et pour la surveillance de la pollution atmosphérique. Toutefois, le rôle de l'observation terrestre dans ces deux domaines n'est pas étudié en détail dans le présent rapport.

La valeur ajoutée de l'observation terrestre réside aussi dans sa capacité à produire des données qui permettent de faire progresser les connaissances scientifiques dans le domaine de l'environnement, en particulier sur le changement climatique. Les organisations météorologiques comme Météo-France contribuent également de manière importante aux travaux de recherche visant à améliorer notre compréhension du climat et de son évolution. Les connaissances scientifiques sont donc un outil essentiel pour aider les responsables politiques à mettre en œuvre des mesures appropriées d'atténuation du changement climatique, d'adaptation au changement climatique, de protection de la biodiversité et de réduction de la pollution.

Au travers de leurs activités, les organisations étudiées dans le présent rapport ont aussi des impacts négatifs directs sur l'environnement du fait de la consommation énergétique de leurs infrastructures et des ressources technologiques qu'elles emploient. L'observation de la Terre contribue également à la pollution spatiale en raison de la prolifération des débris flottant dans l'espace. Cependant, nous pouvons raisonnablement affirmer que ces impacts négatifs sont plus que compensés par les bénéfices environnementaux indirects qu'engendrent ces activités.

Enfin, les activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre ne sont pas éligibles<sup>2</sup> au regard des critères fixés dans l'acte délégué relatif au volet climatique de la taxinomie de l'UE, car les premières n'ont pas pour objectif spécifique la résolution d'un problème environnemental (réduire les émissions de GES, par exemple) et les secondes ne contribuent que très indirectement à l'atténuation du changement climatique et à l'adaptation à ce dernier. Cependant, les services climatiques opérationnels fournis par Météo-France

---

<sup>2</sup> L'éligibilité d'une activité implique que celle-ci soit mentionnée dans l'acte délégué relatif au volet climatique de la taxinomie ou couverte par ce dernier. Au-delà de la simple éligibilité, la conformité d'une activité suppose que celle-ci respecte les critères techniques spécialement définis dans la taxinomie pour une telle activité.

pourraient répondre à la fois aux critères d'éligibilité et de conformité à la taxinomie, pour autant que des informations suffisantes soient recueillies pour en attester.

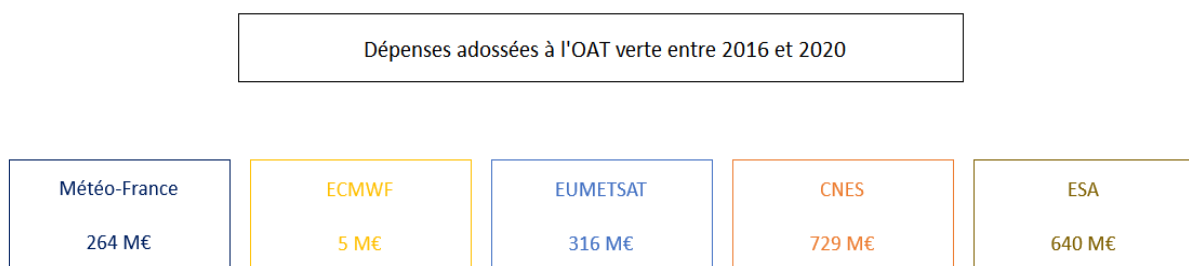
## Introduction

En janvier 2017, l'Agence France Trésor a lancé pour un montant total initial de 7 milliards d'euros la première obligation souveraine verte française, l'OAT 1,75 % 25 juin 2039, dont l'encours actuel s'élève à 30,94 milliards d'euros. En 2021, une deuxième OAT verte (l'OAT 0,50 % 25 juin 2044) a été lancée pour un même montant de 7 milliards d'euros, avec un encours actuel de 14,18 milliards d'euros. Le montant total d'OAT vertes émises se portait ainsi à 45,12 milliards d'euros début 2022. **Ces OAT vertes visent à financer des dépenses du budget de l'État qui contribuent à la résolution des problèmes environnementaux auxquels notre société est confrontée.** Plus précisément, les objectifs des obligations vertes françaises sont l'atténuation du changement climatique, l'adaptation au changement climatique, la protection de la biodiversité et la réduction de la pollution.

**Parmi les dépenses publiques éligibles à un financement par les OAT vertes, le Gouvernement français fait figurer les activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre, qui font l'objet du présent rapport ; celles-ci ont représenté 7,1 % du montant total d'OAT verte émis entre 2017 et 2020. Le présent rapport d'évaluation s'intéresse aux dépenses passées, il ne concerne donc pas les dépenses vertes éligibles adossées à la deuxième OAT verte.** Les dépenses financées par l'OAT verte qui ont été allouées aux activités susmentionnées correspondent aux programmes suivants dans la nomenclature de la loi de finances pour 2021 :

- la subvention de l'État à **Météo-France** (programme 159, action 13 ; 27 % des subventions sont éligibles et correspondent à des dépenses d'investissement et de fonctionnement, et 10 % des subventions sont allouées à la recherche appliquée et à l'innovation) ;
- la part de subvention de l'État au **Centre national d'études spatiales (CNES)** dédiée à l'observation de la Terre à l'échelle nationale (programme 193, action 2, titre 3) ;
- la contribution française à l'**Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT)** (programme 193, action 7) ;
- la contribution française au **Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT)** (une partie du programme 172, action 18, titre 6) ;
- la contribution française aux activités d'observation de la Terre de l'**Agence spatiale européenne (ESA)** (programme 193, action 2, titre 6).

Figure 1 : dépenses adossées à l'OAT verte



Source : documents budgétaires de la France

Comme ces activités sont financées en partie par l'OAT verte, il est important de déterminer la mesure dans laquelle elles contribuent, d'une manière ou d'une autre, aux objectifs environnementaux que la France s'est fixés. En sus de la publication annuelle d'un rapport d'allocation et de performance des OAT vertes, la France s'est aussi engagée à rendre compte des impacts environnementaux des dépenses publiques adossées aux émissions de dette verte. Au titre de cet engagement, des évaluations *ex post* des impacts environnementaux des dépenses vertes éligibles adossées aux OAT vertes sont menées sous l'égide du Conseil d'évaluation des OAT vertes. Dans cette perspective, **l'objectif de la présente évaluation est de fournir des données**

**qualitatives et quantitatives sur les principaux impacts environnementaux des dépenses allouées aux activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre qui sont financées par l'OAT verte.**

L'évaluation s'efforcera également de déterminer **dans quelle mesure les activités conduites par Météo-France, le CEPMMT, EUMETSAT, le CNES et l'ESA respectent les critères établis dans la taxinomie de l'UE.**

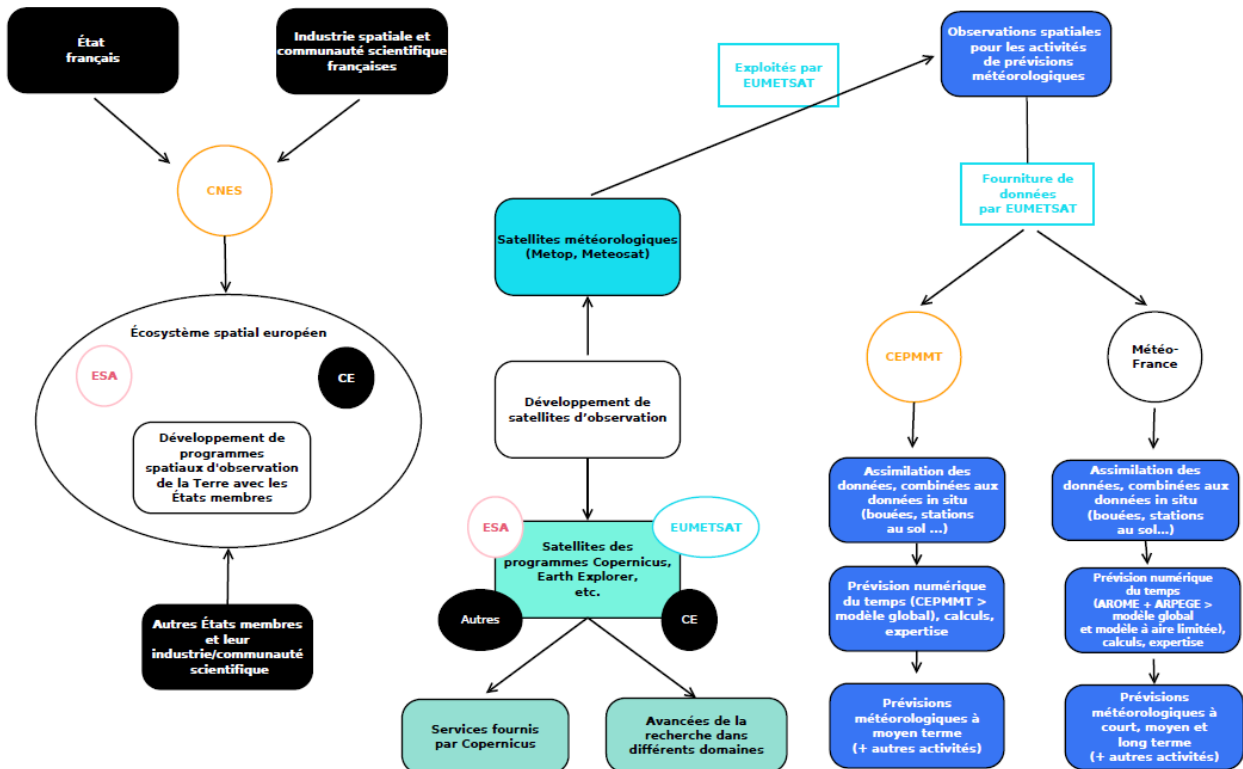
Dans la première partie de l'évaluation, nous proposons une description des activités des organisations financées par l'OAT verte (Météo-France, le CEPMMT, EUMETSAT, le CNES et l'ESA) et détaillons l'enchaînement des étapes aboutissant à la production des prévisions météorologiques. Après avoir exposé le scénario contrefactuel, nous présentons la méthode générale employée. Ensuite, nous fournissons des analyses quantitatives ou qualitatives des impacts environnementaux relatifs à ces activités. Enfin, nous évaluons la mesure dans laquelle les activités de ces organisations peuvent se conformer à la taxinomie de l'UE.

## Les organisations et leurs activités respectives

Le présent chapitre présente les cinq organisations étudiées (ESA, CNES, EUMETSAT, CEPMMT et Météo-France) et leurs activités respectives.

Avant de décrire chacune des organisations en détail, on notera qu'étant donné leurs interactions particulièrement complexes, les activités qu'elles exercent sont très dépendantes les unes des autres, comme l'illustre la figure ci-dessous.

Figure 2 : Les interactions entre les cinq organisations



Légende : CNES = Centre national d'études spatiales ; ESA = Agence spatiale européenne ; EUMETSAT = Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques ; CEPMMT = Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme ; CE = Commission européenne. (Source : réalisé par les auteurs)

Les services météorologiques tels que Météo-France et le CEPMMT utilisent aussi bien les observations de différentes variables atmosphériques et océaniques au sol que les observations spatiales pour faire fonctionner leurs modèles de prévision du temps (voir ci-dessous pour des précisions). Les observations spatiales se sont révélées cruciales pour atteindre le niveau de précision actuel des prévisions météorologiques. De telles observations sont fournies notamment par EUMETSAT, qui exploite les satellites météorologiques, en diffuse les données et participe au développement de ces satellites en coopération avec l'ESA. EUMETSAT contribue également au programme Copernicus par l'emport sur ses satellites météorologiques de certaines des missions Sentinel de Copernicus (voir l'encadré dans la section intitulée « L'Agence spatiale européenne (ESA) » ci-après), à savoir Sentinel-4 et Sentinel-5, et l'exploitation de deux autres missions, Sentinel-3 et Sentinel-6. La figure ci-dessus ne donne qu'un bref aperçu des interactions complexes à l'œuvre entre les organisations étudiées dans ce rapport. Pour autant, les acteurs jouant un rôle dans l'observation de la Terre et les activités météorologiques sont nombreux, notamment en dehors de l'Europe, comme la NASA, la NOAA, le Japon, la Chine, l'Inde, etc., qui échangent avec l'Europe différentes observations spatiales et *in situ*. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) représente également un acteur essentiel en ce qu'elle gère la coopération entre les services météorologiques nationaux du monde entier. À titre d'exemple, la mission Jason-CS, intégrée au programme Copernicus sous le nom de Sentinel-6, sera la prochaine mission de référence pour les mesures du niveau des mers par altimétrie radar. Cette mission

fera intervenir, à différents stades et différentes échelles, le CNES, la NOAA, la NASA, l'Union européenne, l'ESA et EUMETSAT.

### L'Agence spatiale européenne (ESA)

L'ESA est une agence supranationale créée en 1975 pour coordonner les projets spatiaux menés conjointement par ses vingt-deux États membres. Elle entend promouvoir la coopération entre ces pays dans le domaine spatial et conçoit et met en œuvre la politique, les activités et les programmes spatiaux européens à long terme. Ces programmes se répartissent entre programmes obligatoires et programmes facultatifs. Les États membres sont tenus de contribuer au financement des programmes obligatoires, consacrés aux activités de base (études des projets futurs, recherche technologique, investissements techniques communs, systèmes informatiques, programmes de formation) mais peuvent choisir de participer ou non aux programmes facultatifs. Ces derniers portent sur les lanceurs, la navigation, les télécommunications, l'exploration spatiale et l'observation de la Terre.

La présente évaluation est circonscrite aux programmes d'observation de la Terre, pour lesquels l'ESA poursuit **trois types de missions** :

- **les missions scientifiques** : désignées comme missions d'exploration de la Terre, elles ont pour vocation de nous aider à mieux comprendre notre planète. Pour ce faire, elles emploient des technologies spatiales de pointe pour révéler les interactions entre l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et l'intérieur de la Terre. Il est important de noter qu'elles répondent à des questions scientifiques qui permettent de prévoir les effets du changement climatique et qui ont une incidence directe sur les enjeux de société auxquels l'humanité devra sans doute faire face à l'avenir. Certaines missions peuvent être à l'origine du développement d'applications opérationnelles dès lors que la technologie employée gagne en maturité (à l'instar d'Aeolus, désormais utilisé par le CEPMMT pour les prévisions météorologiques).
- **les missions Copernicus** : plus grand programme de surveillance de l'environnement au monde, Copernicus a pris la place du programme de Surveillance mondiale pour l'environnement et la sécurité (GMES) en 2014. Il vise à collecter et diffuser en continu des données fiables sur l'état de la Terre. Ce programme est coordonné et géré par la Commission européenne en partenariat avec l'Agence spatiale européenne, des États membres et des agences de l'UE, telles que l'Agence européenne pour l'environnement. À l'image des missions d'exploration de la Terre, les missions du programme Copernicus participent à améliorer la recherche et les connaissances en matière de changement climatique. Toutefois, ses données sont aussi utilisées au plan opérationnel pour gérer la sécurité maritime, surveiller les catastrophes naturelles (incendies, tremblements de terre, etc.), anticiper les récoltes ou encore améliorer la gestion de notre environnement. Au travers des missions Sentinel (voir encadré page suivante), la Commission européenne et l'ESA proposent des services Copernicus pour toute une gamme d'applications pratiques. Les données issues du programme Copernicus sont en accès libre et gratuit pour les utilisateurs du monde entier, ce qui non seulement favorise cette tâche essentielle qu'est la surveillance de l'environnement, mais permet aussi de stimuler l'esprit d'entreprise, aboutissant à la création d'emplois et à l'émergence de nouvelles opportunités économiques dans le cadre du développement de services opérationnels.
- **les missions de météorologie** : l'ESA développe, en coopération avec EUMETSAT, une flotte de satellites météorologiques, tant sur des orbites polaires que géostationnaires, afin de fournir des données essentielles aux prévisions météorologiques. Les données collectées par ces satellites exploités par EUMETSAT servent également à comprendre et surveiller le changement climatique.


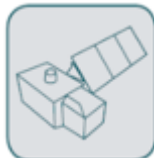
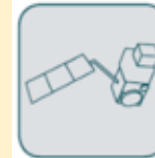



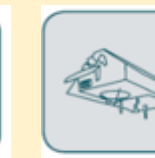
Le programme d'observation de la Terre de l'ESA engendre également de nouvelles découvertes scientifiques et de nouveaux services innovants au travers de ses activités *Science for Society*, ce qui encourage la croissance économique et industrielle en aval. Ces activités favorisent le développement d'un réseau européen de

plateformes d'exploitation des données d'observation de la Terre qui facilite et généralise l'exploitation des données.

### Le point sur le programme Copernicus

Ce programme offre différents services dans divers domaines : surveillance de l'atmosphère, surveillance de l'environnement marin, surveillance terrestre, services concernant le changement climatique, applications de sécurité, gestion des urgences. Ces services s'appuient sur les données d'observation de plusieurs satellites, qui assurent tous des fonctions différentes en observant des caractéristiques particulières de la Terre (atmosphère, sols, océans...). Six missions ont déjà été lancées ou sont en passe de l'être ; baptisées Sentinel, chacune d'entre elles emploie un ou deux satellites et embarque une technologie de pointe capable de fournir un flot d'images et de données complémentaires adaptées aux besoins de Copernicus et de ses services. Ces données sont également exploitées dans l'ensemble de l'Europe par différents acteurs (autorités publiques, entreprises privées...) pour proposer des services, indépendamment de ceux du programme Copernicus.

Figure 3 : Les missions Sentinel

						
<b>Sentinel-1</b> transporte un radar fournissant des images de jour comme de nuit, dans toutes les conditions climatiques, pour surveiller les océans les glaces et les sols, et fournir une assistance dans la gestion des urgences	<b>Sentinel-2</b> transporte un imageur multispectral haute résolution pour la surveillance des sols et du couvert végétal	<b>Sentinel-3</b> transporte une série d'instruments, dont un altimètre radar, un radiomètre infrarouge et un spectromètre imageur pour la surveillance des océans et des sols	<b>Sentinel-4</b> est un spectromètre embarqué sur les satellites Sondeur Meteosat de 3 <sup>e</sup> génération, qui est dédié à la surveillance de la qualité de l'air au-dessus de l'Europe.	<b>Sentinel-5P</b> embarque un spectromètre, principalement dédié à la surveillance de la pollution atmosphérique mondiale	<b>Sentinel-5</b> est un spectromètre embarqué sur les satellites MetOp de 2 <sup>e</sup> génération, qui est dédié à la surveillance de la qualité de l'air mondiale	<b>Sentinel-6</b> embarque un altimètre radar pour mesurer le niveau des mers du globe au service de l'océanographie opérationnelle et des études sur le climat

Source : ESA

La mission Sentinel-5P, temporaire, ne durera que jusqu'au lancement de Sentinel-5 avec la prochaine génération de satellites d'EUMETSAT. Elle complète les missions Sentinel-1, Sentinel-2 et Sentinel-3, qui fournissent des services et alimentent en données la communauté scientifique.

Le tableau ci-dessous décrit le stade de développement de chacune des missions Sentinel.

Programme	Mission	Objectifs	Satellite	Statut
Copernicus	Sentinel-1	Services d'observation des océans et des sols	Sentinel-1A Sentinel-1B	Lancé le 3 avril 2014 Lancé le 25 avril 2016
	Sentinel-2	Services d'observation des sols	Sentinel-2A Sentinel-2B	Lancé le 23 juin 2015 Lancé le 7 mars 2017
	Sentinel-3	Services d'observation des sols et des mers	Sentinel-3A Sentinel-3B	Lancé le 16 février 2016 Lancé le 25 avril 2018
	Sentinel-4	Services d'observation de l'atmosphère	Sondeur Meteosat de 3 <sup>e</sup> génération : MTG-S	Date de lancement prévue : début 2024
	Sentinel-5	Services d'observation de l'atmosphère	Système de satellites polaires de 2 <sup>e</sup> génération : MetOp-SG A	Date de lancement prévue : début 2024
	Sentinel-5P	Services d'observation de l'atmosphère	Sentinel-5P	Lancé le 13 octobre 2017 pour une exploitation jusqu'au lancement de Sentinel-5
	Sentinel-6	Services d'observation des océans	Sentinel-6A Sentinel-6B	Lancé le 21 novembre 2020 Date de lancement prévue : 2025

Précision importante, les missions Sentinel-4, Sentinel-5 et Sentinel-6 ne sont pas encore opérationnelles à ce jour et n'ont donc encore pu produire aucun bénéfice. Cela étant, Sentinel-6 représente la prochaine série des satellites Jason, déjà en orbite depuis quelques années, et grâce auxquels nous disposons d'ores et déjà d'informations sur la mesure du niveau des mers.



## Le Centre national d'études spatiales (CNES)

Le CNES a été créé en 1961 pour coordonner et piloter les activités spatiales françaises. Aujourd'hui, l'établissement travaille en collaboration avec Arianespace (à Évry) et l'Agence spatiale européenne (ESA) dans cinq domaines d'activité : l'accès à l'espace (lanceurs) ; la Terre, l'environnement et le climat (observation) ; les applications destinées aux utilisateurs finaux (télécommunications et navigation) ; la science et l'innovation (dans les champs de l'astronomie et de la physique fondamentale) ; et la sécurité et la défense. Le CNES est à l'origine de nombre de projets spatiaux, même s'il ne construit plus de lanceurs ou de satellites. Il joue aussi le rôle d'assistant au maître d'ouvrage (l'Agence spatiale européenne) dans le cadre des nouveaux développements, notamment concernant le programme Copernicus.

Dans le champ de l'observation de la Terre, le CNES participe à de nombreuses missions, depuis le stade de la recherche jusqu'à l'exploitation, en passant par la conception et le développement. En particulier, il fournit des instruments et participe à l'exploitation scientifique des résultats. L'ESA passe des marchés et les industriels français retenus construisent les satellites. Toutefois, il arrive que le CNES lui-même construise des satellites, aux fonctions très spécifiques (tels que MicroCarb).

L'activité essentielle du CNES est d'échanger avec la communauté scientifique sur les besoins des chercheurs (notamment les scientifiques du GIEC concernant le SMOC, système d'observation mondial du climat) et de faire remonter ces besoins à l'ESA afin qu'elle lance et développe des missions spatiales qui permettront de répondre à ces besoins (en termes de données et d'observations) et de faire avancer la recherche. En d'autres termes, le CNES est chargé de piloter la politique spatiale française, en prenant part aux décisions en matière de projets européens, ainsi qu'à leur conception. Il fait le lien avec la communauté scientifique, assure le suivi des appels d'offres dans le cadre des projets de recherche et codirige un laboratoire de recherche avec le CNRS (chef de file dans l'étude du changement climatique). Le CNES est responsable d'un grand nombre d'innovations technologiques, grâce à son soutien à la communauté scientifique et à son engagement auprès d'elle. L'établissement est à l'origine du tout premier projet européen d'observation de la Terre, Meteosat, dédié à la météorologie, dont le premier satellite a été lancé en 1977. Ensuite, le CNES a mis au point son programme SPOT dédié à l'observation de la Terre (le premier en Europe) pour surveiller l'état de notre planète et de son environnement. Il a également développé des technologies et des instruments précieux (tels que l'imagerie optique, qui s'est révélée essentielle pour le développement de l'observation de la Terre et sert à la mission Sentinel-2 de Copernicus, ou les panneaux solaires des satellites...).

En outre, le CNES a développé des projets de son côté ou dans le cadre de partenariats internationaux, à l'instar de la mission Jason, conçue pour mesurer la topographie de surface des océans. Cette mission (déclinée en Jason-1, Jason-2 et Jason-3) a été développée en collaboration avec la NASA à des fins de recherche et en dehors du cadre de la politique spatiale européenne. Cependant, la mission a rencontré un tel succès qu'EUMETSAT a jugé intéressant de s'y associer dans le cadre de ses activités. La mission Jason a été intégrée au programme Copernicus et implique désormais l'ESA, EUMETSAT, la NOAA et la NASA.

Le CNES est aussi amené à exploiter certains satellites. Pour le projet Merlin<sup>3</sup>, par exemple, le CNES sera chargé du centre de contrôle satellite et du segment sol pour la diffusion des données durant la phase d'exploitation.

L'établissement propose des services payants (« Connect by Cnes ») et dispose d'un laboratoire d'observation de la Terre (Lab'OT) ouvert en 2018 pour accompagner la promotion des solutions spatiales et aider les utilisateurs à développer des applications comprenant une composante satellitaire. Le laboratoire d'observation de la Terre prend également part aux programmes « aval » des futurs projets spatiaux : il

---

<sup>3</sup> MERLIN, acronyme anglais de Mission de télédétection du méthane par LIDAR, est un mini-satellite scientifique mis au point par les agences spatiales française et allemande pour mesurer, avec une précision sans précédent, la répartition géographique et temporelle des émissions de méthane sur l'ensemble de la planète.

informe et forme les utilisateurs potentiels à l'utilisation des données futures et, en retour, contribue à identifier les besoins des utilisateurs afin de les intégrer dans la définition des projets à venir.

### L'Organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques (EUMETSAT)

Créée en 1986, EUMETSAT est une organisation intergouvernementale dédiée à la surveillance des phénomènes météorologiques, du climat et de l'environnement depuis l'espace. Comme l'indique le logigramme présenté plus haut, ses activités se situent au sommet de la chaîne de production des prévisions météorologiques.

L'organisation exploite une constellation de satellites ; cela signifie qu'elle est chargée de faire fonctionner ces satellites en toute sécurité, qu'elle réalise les opérations de suivi et de contrôle nécessaires sur ces satellites comme sur les infrastructures au sol, et qu'elle collecte l'ensemble des données produites. Son rôle est essentiel pour les services météorologiques européens, qui dépendent en grande partie des observations spatiales pour fournir des prévisions fiables et ont besoin de recevoir ces données en continu. EUMETSAT veille également à ce que les données produites par ses partenaires (États-Unis, Japon, Russie, Inde, Chine...) soient diffusées auprès des utilisateurs européens.

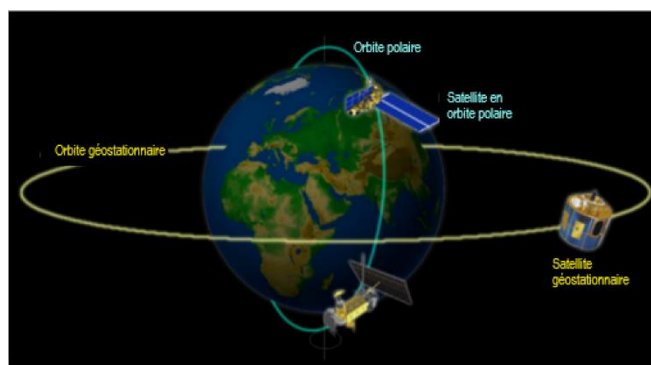
EUMETSAT exploite deux familles de satellites :

- les **satellites géostationnaires** Meteosat-9, Meteosat-10 et Meteosat-11, qui survolent l'Europe et l'Afrique, et Meteosat-8, en orbite au-dessus de l'océan Indien : ces satellites gravitent à une altitude d'environ 36 000 kilomètres, à une vitesse de rotation équivalente à celle de la Terre, ce qui donne l'impression qu'ils sont stationnaires. Ces caractéristiques permettent d'obtenir des observations qui, bien que réalisées à grande distance, sont effectuées à intervalles rapprochés (par exemple, toutes les 5 minutes au-dessus du même point, pour l'Europe), ce qui est particulièrement utile pour les prévisions météorologiques immédiates (en offrant la possibilité de caractériser l'atmosphère et d'anticiper les catastrophes naturelles pour alerter les populations) ;
- les **satellites en orbite polaire** MetOp-A, MetOp-B et MetOp-C, qui tournent autour du globe en passant par les pôles et recueillent des données en continu à 817 km du sol. Plus précis que les satellites géostationnaires du fait de leur plus grande proximité avec la Terre, ils n'observent en revanche que deux fois par jour le même point du globe. Ces caractéristiques sont particulièrement utiles pour les prévisions météorologiques à court terme (jusqu'à trois jours) et à moyen terme (entre trois jours et deux semaines).

Par ailleurs, l'Union européenne a confié à EUMETSAT l'exploitation des quatre missions du segment spatial de Copernicus dédiées à la surveillance de l'atmosphère, des océans et du climat (à savoir Sentinel-3, Sentinel-4, Sentinel-5 et Sentinel-6). EUMETSAT accomplit ces tâches en coopération avec l'ESA et exploite déjà la mission maritime de Sentinel-3. Par conséquent, EUMETSAT ne surveille pas seulement les phénomènes météorologiques, mais également les océans, les sols et l'atmosphère. En diffusant ces données auprès de ses États membres, des services Copernicus et des utilisateurs du monde entier, EUMETSAT :

- accompagne le développement de l'océanographie opérationnelle ;
- surveille les incendies, le couvert végétal, la température de surface des sols, le manteau neigeux, l'humidité des sols, etc. ;

Figure 4 : Les orbites géostationnaire et polaire



Source : NASA

- fournit un appui à la surveillance opérationnelle et à la prévision de la composition de l'atmosphère (aérosols, cendres volcaniques, tempêtes de poussière, ozone, dioxyde d'azote, monoxyde de carbone, méthane, etc.).

Pour exploiter tout le potentiel de ses données satellitaires, le segment sol d'EUMETSAT dispose d'un réseau de huit centres d'applications satellitaires (SAF), chacun d'eux étant spécialisé dans la fourniture de produits dans son domaine d'application respectif. Mettant à profit l'expertise des spécialistes des États membres, les SAF font office de centres d'excellence dédiés pour le traitement des données satellitaires (chacun d'entre eux étant dirigé par un service météorologique national). L'éventail des données et des produits engendré sur l'ensemble de son segment sol est ensuite diffusé aux utilisateurs en temps réel et différé.

En tant qu'agence opérationnelle, EUMETSAT doit également programmer et mettre au point les futurs systèmes de satellites qui permettront de fournir des données d'observation améliorées afin d'alimenter les prévisions et la surveillance du climat. C'est pour cette raison qu'EUMETSAT développe de nouveaux systèmes de satellites en coopération avec l'ESA. Plus précisément, l'ESA est chargée du développement de satellites répondant aux besoins des utilisateurs et à des spécifications définies par EUMETSAT, ainsi que de l'approvisionnement des satellites récurrents pour le compte de cette organisation. EUMETSAT développe tous les systèmes sol indispensables pour fournir les produits et services aux utilisateurs et répondre à l'évolution de leurs besoins, approvisionne les services de lancement et exploite l'ensemble du système au bénéfice des utilisateurs.

Enfin, EUMETSAT réalise également différentes opérations sur ses archives de données, qui sont nécessaires aux services météorologiques pour faire tourner leurs modèles de projection climatique, parmi lesquelles le rééchantillonnage, l'échantillonnage croisé, le retraitement, le contrôle qualité et, pour finir, la diffusion des données auprès de la communauté des spécialistes du climat. À mesure que des progrès sont accomplis dans les observations spatiales, la comparaison des données climatiques d'une année sur l'autre peut se révéler difficile, du fait par exemple que les observations ont été réalisées, une année, dans un format numérique de base, alors qu'elles sont ensuite effectuées dans un format numérique haute définition. Les analyses du climat impliquent des données au long cours qui doivent être homogènes, comparables et exploitables, et c'est ce que garantit EUMETSAT. Par la suite, certains services météorologiques aux technologies avancées peuvent procéder à des réanalyses, c'est-à-dire une nouvelle assimilation de l'ensemble des données au moyen des systèmes d'assimilation de données les plus sophistiqués et les plus récents.

### Le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT)

Le CEPMMT est une organisation intergouvernementale européenne composée de 22 pays membres et de douze autres pays, soit associés, soit en passe de devenir membres. Il a été institué par signature d'une convention en 1975.

Le CEPMMT est à la fois un institut de recherche et un service, opérationnel 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, qui produit et diffuse des prévisions numériques du temps auprès de ses États membres. Ces données sont intégralement mises à la disposition des services météorologiques nationaux (SMN) des États membres. Le CEPMMT propose également un catalogue de données de prévision pouvant être achetées par des entreprises du monde entier.

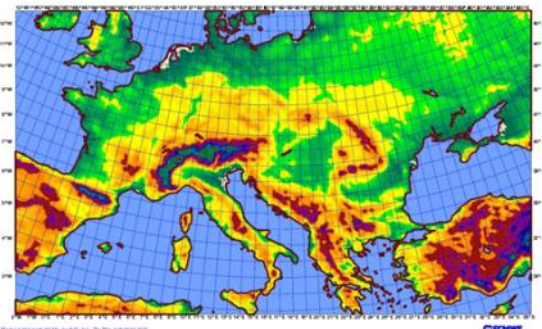
## Comment réaliser une prévision météorologique ?

La réalisation de prévisions météorologiques se déroule en quatre étapes :

- observation de l'état de l'atmosphère à l'aide de satellites (EUMETSAT), de radars, de stations au sol, de bouées... ;
- assimilation des données d'observation, à savoir le traitement qui permet de rendre les données utilisables par le modèle ;
- simulation de l'évolution des paramètres météorologiques à l'aide de modèles reposant sur les lois fondamentales de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et des changements de phase de l'eau ;
- des quantités considérables de calculs sont nécessaires pour réaliser l'assimilation et la simulation en un temps limité, ce qui requiert l'utilisation de supercalculateurs (les résultats de la simulation peuvent ainsi être mis très rapidement à la disposition des prévisionnistes et des utilisateurs concernés).

Le CEPMMT produit des prévisions météorologiques à moyen terme (entre trois jours et deux semaines). Il produit également des prévisions à plus long terme, à horizon du mois ou de la saison, mais jamais à court terme. Pour tous ces horizons temporels, les prévisions requièrent des modèles de prévision couvrant l'ensemble du globe (des modèles globaux). La production de prévisions à court terme, jusqu'à trois jours d'échéance, est principalement du ressort des services météorologiques nationaux (SMN), *via* des modèles à aire limitée offrant une résolution plus fine que celui du CEPMMT, ou pour certains d'entre eux, *via* leur propre modèle global. Le CEPMMT possède l'un des meilleurs modèles globaux au monde avec une résolution de 14 km.

Figure 5 : Le modèle global du CEPMMT



Source : CEPMMT

Une résolution importante permet d'offrir une image détaillée de l'atmosphère, et si l'image est fiable, des prévisions très précises et localisées. Le modèle du CEPMMT (à gauche) fait partie des modèles globaux qui fournissent des prévisions avec une résolution moins fine que celle des modèles à aire limitée. Pour autant, ces modèles globaux sont particulièrement utiles pour observer les tendances à l'échelle de vastes régions et l'évolution des conditions météorologiques sur de longues périodes (de plusieurs jours à quelques semaines). De plus,

les modèles globaux permettent de définir des conditions aux bords pour les modèles à aire limitée employés par les SMN. La France dispose à la fois d'un modèle à aire limitée et d'un modèle global, mais continue de se servir du modèle du CEPMMT pour définir les conditions aux bords de son modèle à aire limitée. Le modèle du CEPMMT est également déterminant pour les prévisions du temps au-dessus de l'océan Indien, donc de l'île de la Réunion, ainsi que les prévisions sur les Antilles, la Guyane française et les territoires français du Pacifique.

Dans le cadre de son modèle, le CEPMMT recourt à des techniques de modélisation informatique avancées et à l'expertise humaine pour analyser les observations et prévoir le temps dans l'ensemble de l'atmosphère terrestre. Son système d'assimilation de données utilise 40 millions d'observations par jour, issues de plus de 50 instruments différents embarqués sur des satellites, et de nombreux systèmes de mesure terrestres et atmosphériques. Il procède également à des réanalyses du climat à l'aide du tout dernier système d'assimilation de données, afin de produire des jeux de données optimisées sur le climat des dernières décennies, qui sont essentiels à la recherche climatique.

De plus, l'organisation mène des recherches sur toutes les dimensions des prévisions météorologiques mondiales jusqu'à un an d'échéance, par le biais d'une collaboration internationale avec ses États membres et ses États coopérants et avec des agences spatiales et des instituts de recherche du monde entier. Elle dispense également des formations pour aider les États membres et les États coopérants à former des experts

en prévision numérique du temps et tient un registre d'archivage des données météorologiques servant aux projections climatiques et aux prévisions météorologiques.

Enfin, le CEPMMT exploite deux services du programme Copernicus pour le compte de l'Union européenne : le service de surveillance de l'atmosphère et le service concernant le changement climatique de Copernicus. Il contribue aussi au service de gestion des urgences de Copernicus et collabore avec son service de surveillance de l'environnement marin.

## Météo-France

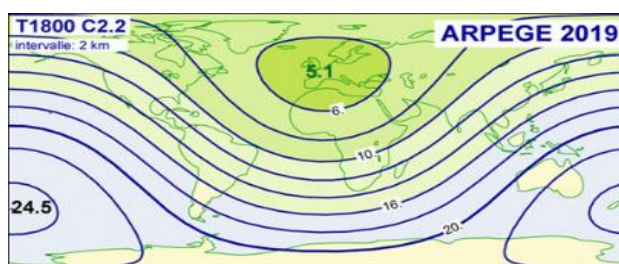
Établissement public à caractère administratif depuis 1993, Météo-France est placé sous la tutelle du ministère de la Transition écologique. Service météorologique national français, Météo-France couvre la métropole et les territoires d'outre-mer et est chargé d'établir des prévisions météorologiques et d'enrichir les connaissances en matière de changement climatique. Météo-France assume au sein de l'OMM la responsabilité de centre régional spécialisé pour la prévision des cyclones tropicaux dans le sud-ouest de l'océan Indien.

Les compétences scientifiques et techniques de l'établissement lui permettent de maîtriser tous les stades de la chaîne de prévision :

- **observation** : Météo-France assure la collecte, le transfert, la diffusion et l'utilisation des données issues des satellites, des réseaux de stations de mesure au sol, des bouées, des radiosondes, des capteurs embarqués sur les avions de ligne ou les navires, et des radars hydrométéorologiques. Météo-France coordonne aussi, à l'échelon national, les réseaux d'observation météorologique en partenariat avec les services de prévision des crues, l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), EDF et plusieurs autres structures nécessitant des données météorologiques, et échange des observations avec le réseau de la Veille météorologique mondiale (VMM) géré par l'OMM. Le Centre de météorologie spatiale de Météo-France reçoit, traite et diffuse les données des satellites météorologiques (assimilation) ;

- **modélisation** : une fois les données assimilées, elles peuvent être intégrées aux modèles de prévision numérique du temps. Météo-France emploie un modèle global, à l'instar du CEPMMT, mais aussi un modèle à aire limitée. Les prévisionnistes commencent par simuler les phénomènes atmosphériques majeurs à l'œuvre autour de la Terre à l'aide de modèles globaux, puis zooment sur des portions de plus en plus étroites du territoire au moyen de modèles à aire limitée qui offrent davantage de précision dans la zone couverte. Le modèle global de Météo-France, nommé ARPEGE, permet la simulation et la prévision des phénomènes de grande échelle que sont les dépressions, les anticyclones ou les systèmes de fronts jusqu'à trois jours à l'avance. Il offre une résolution de 5 km au-dessus de l'Europe et de 16 km sur le reste du globe (comme illustré à droite). Ce modèle est complété par celui du CEPMMT, mais aussi par le modèle ALADIN mis au point par Météo-France pour affiner ses prévisions sur les Antilles, la Guyane française, la Polynésie française et la Nouvelle-Calédonie (avec une résolution d'environ 7 km sur ces zones) et ses prévisions de cyclones dans l'océan Indien (y compris l'île de la Réunion). Météo-France a développé un modèle à aire limitée haute résolution (1,3 km en 2015) sur la France métropolitaine et quelques-uns de ses voisins (Allemagne, Belgique, Suisse et Pays-Bas). Ce dernier permet d'améliorer la prise en compte des phénomènes locaux et la prévision des phénomènes dangereux sur des échelles de temps de 3 à 36 heures. Il nécessite que les conditions aux bords soient définies par le modèle du

Figure 6 : La résolution du modèle global de Météo-France



Source : Météo-France

CEPMMT. Faire tourner ces modèles nécessite des ordinateurs extrêmement puissants, appelés supercalculateurs. Entre 2016 et 2020, Météo-France possédait deux supercalculateurs offrant une puissance de calcul théorique de 5 pétaflops, soit 5 millions de milliards d'opérations par seconde. En 2020, le remplacement des supercalculateurs a permis d'atteindre une puissance de calcul de 20 pétaflops ;

- analyse par les prévisionnistes : les prévisionnistes de Météo-France évaluent l'incertitude associée aux prévisions résultant des modèles, caractérisent les risques de phénomènes dangereux et prennent des décisions en matière de vigilance. Ils veillent à maintenir un contact direct avec certaines catégories d'utilisateurs, tels que les services de sécurité civile en France.

De plus, Météo-France réalise des prévisions à plus long terme (prévisions saisonnières et projections climatiques). Elle élabore des scénarios climatiques régionalisés à des fins opérationnelles dans différents secteurs. Elle fournit différents produits et services climatiques liés à la maîtrise de l'énergie, à l'agriculture durable, aux modes de transport durables, à l'adaptation au changement climatique, etc. Les acteurs opérationnels ont directement accès aux projections climatiques régionalisées au travers des jeux de données climatiques en accès libre mis à disposition par Météo-France au sein de son portail des données publiques (anciennement « climathèque ») ou bénéficient d'un service d'assistance dédié de la part de Météo-France. Comme l'évolution du climat peut également être anticipée à quelques mois d'échéance, Météo-France publie des prévisions saisonnières pour le trimestre à venir. Toutefois, ces prévisions saisonnières demeurent incertaines et difficiles à estimer avec précision, en particulier en Europe. De telles prévisions représentent plutôt des tendances générales aux probabilités incertaines, encore au stade de la recherche, mais sont de plus en plus employées au niveau opérationnel sur la ceinture tropicale où les interactions avec les conditions océaniques influent plus directement sur la prévisibilité.

L'établissement s'implique aussi fortement dans la recherche pour une meilleure compréhension du changement climatique. Un nombre considérable de travaux de recherche ont été accomplis par le CNRM (Centre national de recherches météorologiques, dirigé par Météo-France) pour mieux appréhender les mécanismes du climat, les modéliser et modéliser leurs impacts à l'échelon local et sur l'ensemble de la planète. L'établissement est un contributeur majeur des travaux du GIEC. Plus généralement, le centre de recherche étudie les différentes composantes du système Terre (atmosphère, sol, manteau neigeux, océans, végétation) pour mieux comprendre les processus naturels et leur évolution, et ce faisant, améliorer la prévision du temps et du climat.

## Scénario contrefactuel

Le scénario contrefactuel que nous avons choisi repose sur l'hypothèse suivante : **aucune subvention n'est versée à Météo-France ni au CNES, et la France n'a jamais contribué au CEPMMT, à EUMETSAT ni à l'ESA.**

Aucune subvention accordée aux organisations météorologiques

Météo-France dépend massivement des subventions, qui, en 2019, représentaient 46,3 % de son budget total<sup>4</sup>. Le reste de son budget provient de la subvention finançant la contribution de la France à EUMETSAT (19,3 % en 2019), des redevances de navigation aérienne recouvrées par la direction générale de l'aviation civile (21,8 %), de recettes commerciales (8 %), ainsi que d'autres revenus (4,7 %). Sans les subventions à Météo-France et à EUMETSAT, non seulement Météo-France perdrait quasiment les deux tiers de son budget, mais elle pourrait perdre, en partie du moins, l'accès aux observations spatiales fournies par EUMETSAT. En conséquence, l'infrastructure de prévision française aurait principalement accès aux observations *in situ* (via les radars, radiosondes, capteurs...). En outre, l'absence de contribution française au CEPMMT priverait Météo-France d'un accès aux prévisions haute résolution à moyen terme de celui-ci, ainsi qu'aux données de son modèle global permettant de définir les conditions aux bords du modèle à aire limitée de Météo-France. Si l'on cumule tous ces effets, **on peut raisonnablement en déduire que Météo-France ne disposerait pas de ressources financières et technologiques suffisantes pour fonctionner et ne serait pas en mesure de fournir des services fiables. C'est pourquoi nous postulons dans notre scénario contrefactuel que Météo-France n'existe pas et n'a jamais existé.** Concrètement, cela signifie qu'il n'y aurait pas de modèle à aire limitée de Météo-France capable de produire des prévisions météorologiques à court terme précises en France métropolitaine. En l'absence de modèle de prévision global et d'accès au modèle global du CEPMMT, la France n'aurait pas non plus accès à des prévisions météorologiques à court terme moins précises sur ses territoires (y compris les outre-mer), ni aux prévisions météorologiques à moyen terme les plus fiables sur l'Europe offertes par le CEPMMT (qui sont essentielles aux prévisions météorologiques dans les outre-mer). Ajoutons à cela qu'en France, d'autres services de prévision météorologique concurrents reprenant les résultats des modèles de Météo-France, à l'instar de La Chaîne Météo ou de Météociel, et partageant leurs prévisions avec des services non institutionnels, ne pourraient pas non plus exister.

Au-delà des frontières françaises, **les autres pays européens se retrouveraient aussi dans une situation dégradée** par rapport à la situation existante. La contribution annuelle de la France représentant environ 14 %<sup>5</sup> du budget total du CEPMMT, et Météo-France travaillant en étroite collaboration avec le CEPMMT pour développer le modèle global de ce dernier, on imagine aisément que **le service rendu au niveau européen serait moins efficace** qu'il ne l'est aujourd'hui. En outre, les contributions des États membres constituent la principale source de revenus d'EUMETSAT pour assurer sa mission et sont proportionnelles, pour ses activités obligatoires, au revenu national brut (RNB) de chaque État. Au vu de son poids dans l'économie européenne, la contribution de la France est relativement importante. Pour les activités obligatoires, elle représentait par exemple 13,9 % du total des contributions en 2019<sup>6</sup>. On peut donc penser que, dans le scénario contrefactuel, les prévisions météorologiques du CEPMMT et des SMN étrangers seraient dégradées par rapport à la situation existante. Toutefois, il est difficile de déterminer le niveau de précision des prévisions météorologiques des autres SMN européens, notamment ceux du Royaume-Uni et de l'Allemagne qui sont les seuls autres services en Europe (si l'on fait exception de celui de la France et du CEPMMT) à disposer d'un modèle global en mesure de réaliser des prévisions couvrant l'Europe et donc la France (avec une résolution sur l'Europe de 10 km pour le modèle britannique, et de 7 km pour le modèle allemand).

<sup>4</sup> Source : meteofrance.fr.

<sup>5</sup> Informations réunies au cours d'un entretien avec un représentant du CEPMMT.

<sup>6</sup> Source : annexes budgétaires de l'État français : <https://www.performance-publique.budget.gouv.fr/sites/performance-publique/files/farandole/ressources/2019/pap/html/DBGPGMJPEPGM193.htm>.

À la lumière de toutes ces conséquences, le scénario le plus probable que nous avons retenu est le suivant : **la France s'appuierait sur les prévisions météorologiques des États-Unis, fournies par la NOAA grâce au modèle GFS (Global Forecast System)**. Ce modèle de prévision du temps produit des données pour des dizaines de variables atmosphériques et terrestres, dont les températures, les vents, les précipitations, l'humidité du sol et la teneur en ozone de l'atmosphère. Il s'agit d'un modèle global qui couvre toute la surface de la planète avec une résolution horizontale de base de 18 milles terrestres (28 kilomètres) entre deux points de grille pour les prévisions à moins d'une semaine. La résolution horizontale est moins importante pour les prévisions à horizon d'une à deux semaines : 44 milles terrestres (70 kilomètres) entre deux points de grille. Ce modèle fournit des analyses et des prévisions limitées à 16 jours. La NOAA exploitant ses propres satellites météorologiques en collaboration avec la NASA, **on peut supposer que l'agence états-unienne serait toujours en mesure d'offrir un service relativement fiable à ses citoyens et aux autres pays.**

#### Aucune subvention pour les activités d'observation de la Terre

Le CNES et l'ESA ne disposent pas d'un budget fixe qui détermine les programmes spatiaux à développer. Ils proposent différents programmes aux États européens (l'État français pour le CNES et les États membres de l'Union européenne pour l'ESA). Ensuite, les États décident quels programmes spatiaux ils souhaitent mettre en œuvre et dans quels programmes ils vont investir, sachant que, si un pays contribue à hauteur de 10 % au financement d'un programme, 10 % de l'activité liée à ce programme (développement de satellites, recherche...) est réalisée par l'industrie du pays en question.

Dans une situation où l'État français n'aurait jamais financé aucun programme d'observation de la Terre, le CNES n'aurait pas pu développer de projet dans ce domaine, ni fournir des instruments ou participer à l'exploitation scientifique des observations terrestres. **C'est pourquoi nous pouvons raisonnablement postuler dans notre scénario contrefactuel que le CNES ne participe pas aux activités d'observation de la Terre et que tous les projets auxquels il a contribué n'existent pas.**

L'absence du CNES des activités d'observation de la Terre, imaginée dans notre scénario contrefactuel, aurait des répercussions importantes sur l'observation terrestre telle que nous la connaissons aujourd'hui, et ce pour plusieurs raisons :

- concernant l'Europe, c'est en France qu'est née l'observation de la Terre grâce au CNES, qui a mis au point son premier satellite pour l'ESA (le satellite de prévision météorologique Meteosat), un satellite conçu par une équipe du CNES en mettant à profit le savoir-faire technique des industriels français et lancé en 1977 ;
- par la suite, l'État français a lancé son programme SPOT avec un autre satellite (SPOT-1 en 1986), bien avant que l'ESA ne démarre son propre programme d'observation de la Terre. Pour ce faire, le CNES a mis au point le système d'imagerie optique de ce satellite, qui sert encore aux satellites de la mission Sentinel-2 du programme Copernicus ;
- le CNES a également joué un rôle majeur dans la mise au point de nombreux instruments et éléments de satellites, tels que les panneaux solaires qui leur procurent de l'énergie ;
- les projets issus du CNES sont principalement dédiés à la recherche, mais certains d'entre eux sont devenus ou pourraient devenir opérationnels et intégrer le programme Copernicus. À titre d'exemple, le CNES a développé la mission Jason (topographie des océans) aux côtés de la NASA, initialement dans un but de recherche, mais devant son utilité et ses perspectives prometteuses, l'ESA et EUMETSAT se sont associés au projet pour l'intégrer au programme Copernicus dans le cadre de la mission Sentinel-6. **C'est pourquoi la contribution du CNES au développement des technologies et des missions est majeure, au plan de la recherche tout d'abord, mais aussi par les applications prometteuses qui peuvent en résulter.**



L'absence de participation française aux programmes européens d'observation de la Terre, qui aurait également découlé du non-versement de ses contributions à l'ESA, aurait aussi eu des répercussions sur les avancées en matière d'observation terrestre. Comme nous l'expliquons plus haut, la participation financière de chaque pays reflète la proportion dans laquelle ce pays contribue techniquement et scientifiquement au programme, *via* son industrie nationale. Pendant longtemps, la France est demeurée le premier contributeur du programme Copernicus (elle en est aujourd'hui le troisième) ainsi que d'autres missions, disposant du plus grand savoir-faire technique et scientifique dans le domaine spatial grâce à son industrie. Sans l'engagement de la France dans les programmes d'observation de la Terre, l'ESA n'aurait pas pu signer des contrats avec les industriels français qui se sont révélés déterminants pour réaliser certaines avancées (panneaux solaires, imagerie optique, plateforme satellite...).

C'est pourquoi nous pouvons raisonnablement avancer dans notre scénario contrefactuel que l'Europe n'aurait pas encore pu acquérir le niveau de technologie actuellement disponible en matière d'observation de la Terre. Même si le programme Copernicus et les autres missions auraient pu finir par émerger, cela aurait pris plus de temps, dans la mesure où il aurait fallu que les compétences techniques développées en France se matérialisent ailleurs. Cela confirme le fait que, dans notre scénario contrefactuel, les activités d'EUMETSAT se trouveraient dégradées compte tenu du rôle majeur joué par la France dans le développement du programme spatial européen, y compris concernant les satellites d'EUMETSAT.

Par conséquent, **on peut faire l'hypothèse dans notre scénario contrefactuel de la non-participation du CNES aux activités d'observation de la Terre (et, partant, de l'inexistence des missions de recherche auxquelles il a contribué), ainsi que de l'absence du programme Copernicus, du fait du retard technologique et scientifique par rapport à la situation existante.** Les programmes assurés par l'ESA se limiteraient donc à des projets d'exploration (c'est-à-dire au stade de la recherche), comme c'était le cas il y a plusieurs décennies, avec des progrès importants à accomplir pour aboutir à des services opérationnels et être en mesure de fournir des données fiables et nombreuses à la communauté scientifique.

**Le programme américain Landsat, qui fournit également des données ouvertes et libres de droits, se serait sans doute développé d'une manière semblable à la situation actuelle. Toutefois, la résolution des images produites par ses satellites est bien plus faible que celle des images transmises par les satellites des missions Sentinel. C'est pourquoi nous postulons qu'aucun autre programme international n'aurait pu fournir des données gratuites avec le degré de qualité du programme Copernicus, ce qui signifie que les services développés en utilisant les données de Copernicus dans divers secteurs en Europe n'existeraient sans doute pas non plus.**

#### Un scénario contrefactuel purement théorique

Rappelons que le scénario contrefactuel est fictif et qu'une part d'incertitude demeure. Par exemple, les relations entre services et les partenariats de coopération sont monnaie courante dans le secteur de la météorologie, notamment au travers de l'Organisation météorologique mondiale, qui facilite les échanges d'informations météorologiques par-delà les frontières. En outre, les agences spatiales telles que le CNES et l'ESA participent à la mise au point des satellites pour EUMETSAT, mais aussi à des partenariats avec la NASA et la NOAA (voir l'exemple de la mission Jason-CS). **C'est pourquoi il est probable qu'un fonctionnement dégradé de l'ESA et d'EUMETSAT et la non-participation du CNES aux activités d'observation de la Terre auraient aussi des répercussions sur les agences météorologiques non européennes, telles que la NOAA.** Pour des raisons de simplification de l'évaluation, **nous faisons l'hypothèse que le service états-unien de prévisions météorologiques ne serait pas affecté et constituerait la principale source de prévisions météorologiques pour la France.**

L'absence du programme Copernicus est, elle aussi, tout à fait incertaine. Bien que la France ait un rôle considérable, de par ses contributions financières, tout autant que scientifiques ou technologiques, on peut penser que l'Allemagne et l'Italie auraient investi davantage dans le développement des activités

d'observation de la Terre et auraient réalisé des avancées capitales, ou que l'UE aurait coopéré avec des agences internationales pour développer le programme. **Comme il est impossible de savoir avec certitude ce qu'il se serait passé sans la contribution de la France, nous décidons de postuler l'absence du programme Copernicus dans notre scénario de référence.**

En partant de ce scénario contrefactuel, **nous allons analyser les implications qui en découlent pour chaque secteur et chaque impact que nous allons étudier.** Ainsi, un service de prévision météorologique dégradé peut avoir des conséquences différentes selon les secteurs. Par exemple, on peut imaginer que des prévisions non localisées ne seraient d'aucune utilité pour les agriculteurs et équivaldraient à une absence pure et simple de prévisions. En revanche, l'absence de précision dans les prévisions aurait sans doute des conséquences moins lourdes sur l'adaptation des villes au réchauffement climatique sur le long terme.

## Méthode générale

Pour notre évaluation, nous avons veillé à faire autant que possible la distinction entre les activités de prévision météorologique et celles d'observation de la Terre. Bien que ces deux types d'activités puissent être complémentaires, il était plus aisé de les traiter séparément pour identifier et analyser leurs impacts, puis de mettre en évidence leurs synergies. Ce choix a été motivé par le fait que la chaîne des impacts, depuis les activités des organisations jusqu'à leurs effets sur l'environnement, n'est pas tout à fait la même selon que l'on examine l'observation de la Terre ou la prévision du temps (voir section suivante). EUMETSAT constitue un cas particulier en ce qu'elle réalise des observations depuis l'espace, mais dans l'optique de produire des prévisions météorologiques. En tant que premier maillon de la chaîne d'impacts des activités météorologiques, elle a été regroupée avec ces activités.

La méthode suivie pour les activités de prévision du temps (Météo-France, CEPMMT, EUMETSAT) et l'analyse de leurs impacts comporte quatre grandes étapes. **Premièrement, nous avons identifié tous les secteurs principaux dont les activités dépendent des prévisions météorologiques et des projections climatiques**, afin de nous faire une idée exacte du périmètre de l'étude. Un examen des différents rapports d'évaluation socioéconomique rédigés sur des thématiques météorologiques (par ex. Citizing, 2016 ; Citizing, 2017 ; France Stratégie, 2018 ; Citizing, 2021 ; London Economics, 2015 ; Leviäkangas *et al.*, 2007 ; Leviäkangas et Hautala, 2009) nous a permis de recenser les secteurs les plus importants. **Deuxièmement, il nous a fallu identifier les impacts environnementaux dans les différents secteurs identifiés à l'étape précédente**. Pour ce faire, nous avons passé en revue les évaluations socioéconomiques des activités météorologiques citées plus haut, avons mené des entretiens avec des représentants de Météo-France et du CEPMMT et avons bénéficié de l'expertise de Michel Jarraud<sup>7</sup>, spécialiste en prévision numérique du temps, pour la validation des impacts et leur ajustement. La liste finale obtenue contenait 44 impacts positifs sur l'environnement<sup>8</sup> répartis sur cinq secteurs, et trois impacts négatifs directement liés aux activités météorologiques (voir [annexe A tableaux A1 et A2](#) pour l'ensemble des impacts et leurs justifications). **Troisièmement, le grand nombre d'impacts environnementaux et le temps limité dont nous disposons pour mener cette évaluation ont imposé de sélectionner ces impacts de manière pragmatique**. C'est pourquoi nous avons proposé un outil d'aide à la décision simple et clair, frappé au coin du bon sens, pour définir de la manière la plus objective possible une classification des impacts environnementaux. Cet outil repose sur une méthode de notation présentée en détail à l'[annexe B](#). Dans la liste réduite, nous avons retenu dix impacts environnementaux répartis sur cinq activités recourant à des prévisions météorologiques ou à des projections climatiques, que nous avons étudiés en profondeur (les impacts considérés comme majeurs selon notre méthode de notation). Pour autant, nous avons décidé de présenter à l'aide d'une analyse qualitative quelques impacts supplémentaires (considérés comme importants sans l'être autant que les dix autres retenus) afin de couvrir d'autres thématiques intéressantes pour lesquelles les activités météorologiques peuvent jouer un rôle. De plus, nous avons inclus une section consacrée à la recherche (en matière de météorologie comme d'observation de la Terre) dans la mesure où ces activités ont permis des avancées considérables dans les champs de l'étude du climat et de l'environnement. Ces avancées ont permis d'étoffer nos connaissances sur le changement climatique, qui sont essentielles à la prise de décisions politiques en vue d'atténuer le changement climatique et de s'y adapter. **Pour finir, nous avons tenté de quantifier autant d'impacts que possible :**

- en identifiant les moyens technologiques employés par les organisations étudiées pour réaliser leurs prévisions météorologiques et projections climatiques ;

<sup>7</sup> Michel Jarraud a été le secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) de 2004 à 2015. Spécialiste en prévision numérique du temps, il a occupé des postes opérationnels de haut niveau chez Météo-France et au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) avant de rejoindre l'OMM.

<sup>8</sup> Répartis sur plus de 30 activités faisant usage de prévisions météorologiques pour mener des actions ayant un ou plusieurs impacts potentiels sur l'environnement.

- en déterminant, dans le cadre de notre scénario contrefactuel, les conséquences des activités que nous avons retenues pour notre étude (agriculture, énergie...);
- en définissant une stratégie de quantification en fonction des mesures environnementales disponibles, des données accessibles et de la littérature spécialisée, afin d'estimer l'ampleur des impacts des activités de prévision météorologique ;
- en s'appuyant sur des hypothèses pour proposer des ordres de grandeur des impacts étudiés, ou en produisant des analyses qualitatives.

En ce qui concerne ce dernier point, certains éléments qualitatifs (notamment pour décrire les différents secteurs, leurs rapports avec les prévisions météorologiques, ou certaines études de cas) ont été repris de travaux réalisés par Citizing au cours de précédentes missions d'évaluation. C'est le cas par exemple des parties sur le transport maritime et la pollution marine, des enjeux pour lesquels un travail conséquent avait été accompli dans le cadre de l'évaluation socioéconomique du supercalculateur du CEPMMT (Citizing, 2017).

Deux autres points importants sont à préciser :

- Plutôt qu'une simple analyse qualitative, nous avons préféré quantifier certains impacts en partant d'hypothèses sur leur ampleur, l'objectif étant de donner une idée de l'ordre de grandeur potentiel d'un impact à l'aide d'une fourchette de valeurs estimées reposant sur un raisonnement qualitatif (par exemple, parlons-nous de milliers ou de millions de tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> évitées grâce aux prévisions météorologiques ?). Les hypothèses fragiles ont été soumises à des tests de sensibilité.
- Le périmètre de l'étude des impacts des prévisions météorologiques se limite à la France (mais peut parfois dépasser, comme nous le verrons, les frontières du pays, notamment pour ce qui concerne les activités maritimes) et à la période postérieure à 2016, qui est l'année de démarrage de l'OAT verte française. Toutefois, dans la mesure où les impacts environnementaux et les activités météorologiques ont un horizon temporel plus long, il peut nous arriver de remonter plus loin dans le passé afin de lisser des variables hétérogènes d'une année sur l'autre et de dessiner plutôt de grandes tendances.

En ce qui concerne la méthode d'analyse des activités d'observation de la Terre (CNES et ESA) et de leurs impacts, **nous avons commencé par identifier toutes les missions auxquelles l'ESA ou le CNES ont participé. Puis nous avons étudié, au moyen de la littérature spécialisée et d'entretiens menés avec des représentants de ces organisations, les impacts environnementaux potentiels des données d'observation de la Terre transmises par Copernicus, en identifiant les services opérationnels fournis en Europe qui reposent (au moins en partie) sur des données spatiales et apportent un soutien aux utilisateurs, permettant de prévenir les dommages à l'environnement.** Ces données étant ouvertes à tous et libres de droits, nous ne pouvons garantir que tous les services existants qui utilisent des données spatiales aient été recensés pour cette évaluation. Néanmoins, nous avons identifié les principaux secteurs et types de services utilisant des données d'observation de la Terre à l'aide des entretiens et du passage en revue des différents services du programme Copernicus (voir l'annexe A *tableau A3* pour une liste non exhaustive). **Au vu du temps limité dont nous disposions pour mener cette évaluation, nous avons décidé de nous concentrer sur les services relevant de secteurs que nous n'avons pas déjà traités dans l'analyse des activités de prévision météorologique.** Toutefois, ce rapport étudie aussi le rôle des activités d'observation de la Terre dans la gestion des feux de forêt et les traitements agricoles (secteurs également pris en compte pour l'analyse des prévisions météorologiques), d'une part parce que ces secteurs ont reçu une note élevée dans notre classement des impacts des prévisions météorologiques par ordre d'importance, et d'autre part, parce que ce sont ceux qui ont le plus d'impacts sur l'environnement.

Pour finir, nous avons recensé l'ensemble des missions spatiales dédiées à la recherche dans les champs de l'étude du climat et de l'environnement.

La quantification des impacts environnementaux de l'observation de la Terre posant trop de difficultés (voir section suivante), nous avons décidé de proposer des analyses qualitatives et des études de cas démontrant,

pour l'Europe, la contribution potentielle que peuvent apporter les données spatiales aux enjeux environnementaux.

Concernant l'observation de la Terre, le périmètre de l'étude ne se limite pas à la France puisque l'ESA opère à l'échelle européenne (et parfois même au-delà). Bien que les subventions versées pour les activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre aient commencé à être adossées à l'OAT verte en 2016, nous sommes remontés un peu plus loin dans le passé, dans la mesure où les missions spatiales se déroulent généralement sur des années, de la mise au point du satellite jusqu'à la fin de son exploitation dans l'espace.

**Cette évaluation laisse inévitablement de côté certains impacts environnementaux des activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre, celles-ci couvrant un nombre considérable de sujets de toute nature. Cependant, les impacts retenus pour l'étude nous permettent de présenter une liste regroupant des actions très variées et l'ensemble des principaux secteurs qui tirent profit de ces prévisions ou observations, en nous focalisant plus particulièrement sur les actions dans lesquelles ces prévisions ou observations engendrent des impacts environnementaux importants (du point de vue de leur ampleur ou de leur fréquence).**

## Difficultés de l'évaluation

Dans le secteur de la météorologie, l'une des premières difficultés méthodologiques porte sur le caractère distant du lien entre les prévisions météorologiques (réalisées par Météo-France et le CEPMMT) et leurs bénéfices environnementaux. De fait, la chaîne de valeur illustrée ci-dessous, qui s'étend des prévisions aux impacts sur l'environnement, fait apparaître plusieurs filtres susceptibles de réduire l'impact final. La chaîne est encore plus longue pour EUMETSAT, puisque celle-ci réalise des observations de la Terre pour produire des prévisions météorologiques.

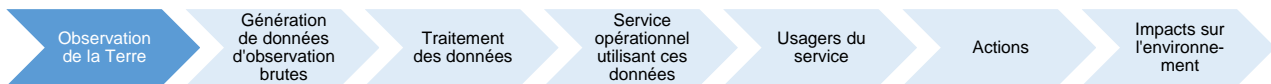
Figure 7 : La chaîne de valeur des prévisions météorologiques



À l'instar de tous les autres SMN, Météo-France n'est donc pas un « producteur direct » de bénéfices environnementaux, mais fait plutôt figure de levier pour produire ces bénéfices. Cette chaîne de valeur comportant de multiples étapes explique en grande partie la difficulté à quantifier avec précision le bénéfice environnemental imputable aux prévisions météorologiques et à l'infrastructure météorologique et climatologique.

Les activités d'observation de la Terre conduites par les agences spatiales engendrent également des impacts environnementaux de façon indirecte, selon le mécanisme représenté ci-dessous. Le programme opérationnel Copernicus fournit des données ouvertes et libres de droits à l'usage de la population, des autorités publiques et des entreprises, qui peuvent s'en servir pour développer des services opérationnels dans divers secteurs. Ensuite, les usagers s'appuient sur ces services pour mener des actions qui sont susceptibles d'engendrer des bénéfices pour l'environnement.

Figure 8 : La chaîne de valeur de l'observation de la Terre



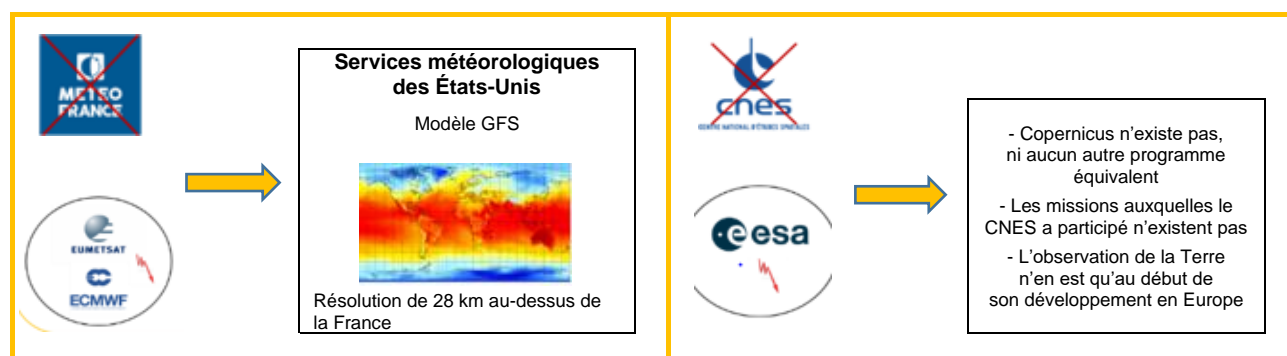
C'est pourquoi l'ampleur de l'impact peut dépendre de la qualité et du contenu du service utilisant les données d'observation de la Terre, qualité et contenu qui varient probablement entre entreprises et entre régions d'Europe. En outre, les données spatiales ne contribuent qu'en partie au développement de ces services, qui reposent également sur des données *in situ*, l'intelligence artificielle, des algorithmes d'apprentissage automatique, des modèles, etc.

À cette difficulté s'ajoutent les carences de la littérature sur l'étude des impacts environnementaux des activités météorologiques et d'observation de la Terre. Cela n'est pas surprenant dans la mesure où l'environnement reste un domaine difficile à étudier et à quantifier, et que les impacts des activités météorologiques et d'observation de la Terre restent très indirects au vu des mécanismes décrits ci-avant. Par ailleurs, nous avons encore peu de recul sur Copernicus, qui n'a été mis en place qu'en 2014 en tant que programme opérationnel.

Enfin, déterminer la part des impacts attribuable aux subventions françaises constitue également un défi puisque les activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre dépendent d'un écosystème aux composantes particulièrement interconnectées, dans lequel ces activités donnent régulièrement lieu à des partenariats internationaux, y compris avec des pays non européens.

## Vue d'ensemble

Le scénario contrefactuel décrit ci-avant est illustré par les figures suivantes et servira, tout au long du rapport, à comparer les différents impacts environnementaux.



Ces impacts sont classés par secteur et font l'objet d'une analyse quantitative ou qualitative.

Tableau 1 : Liste des impacts sur l'environnement et vue d'ensemble des analyses quantitatives et qualitatives

Secteur	Impact	Météo		Observation de la Terre	
		Quanti	Quali	Quanti	Quali
Agriculture et sylviculture	Optimisation des traitements agricoles	✓	✓		✓
	Prévention et contrôle des feux de forêt et de leurs conséquences	✓	✓		✓
	Gestion des forêts et de leurs écosystèmes				✓
	Gestion de l'utilisation des sols et déclin des habitats				✓
Production d'énergie	Développement des énergies solaire et éolienne		✓		
	Diminution des erreurs de prévision dans la production d'énergie solaire et éolienne réduisant le besoin de compensation par des énergies fossiles pour assurer l'équilibre offre/demande sur le marché de l'électricité	✓	✓		
	Gestion des barrages hydroélectriques		✓		
	Gestion des centrales nucléaires lors des canicules		✓		
Zones maritimes et autres zones aquatiques	Optimisation du routage des navires pour le transport maritime	✓	✓		
	Gestion des marées noires		✓		
	Surveillance des zones humides				✓
	Surveillance des écosystèmes côtiers et des tendances d'érosion des côtes				✓
Zones urbaines	Adaptation aux îlots de chaleur		✓		
	Atténuation de la pollution atmosphérique		✓		
Recherche	Amélioration des connaissances sur le climat		✓		✓
	Amélioration des recherches sur l'environnement				✓
Activités météorologiques et d'observation de la Terre	Impacts environnementaux directs des activités des organisations	✓	✓		✓

Source : réalisé par les auteurs.

Légende :

- en gris : non concerné par l'impact ; en marron : concerné mais non évalué pour le présent rapport ; en jaune : autres
- case « Quanti » cochée : l'impact a été quantifié pour l'un au moins des objectifs environnementaux (atténuation du changement climatique, adaptation au changement climatique, protection de la biodiversité, réduction de la pollution)
- case « Quali » cochée : l'impact a fait l'objet d'une analyse qualitative (en sus ou non d'une analyse quantitative)

# Impacts environnementaux des activités météorologiques et d'observation de la Terre

## 1. Agriculture et sylviculture

### A. Optimisation des traitements agricoles

Les surfaces cultivées couvrent environ 173 millions d'hectares en Europe (39 % de la superficie terrestre totale de l'UE), dont 26,9 millions d'hectares en France métropolitaine, c'est-à-dire près de 50 % de son territoire<sup>9</sup>. Quatre types principaux de cultures peuvent être distingués :

- les cultures extensives, dont la production de céréales et d'oléagineux
- les cultures permanentes autres que les prairies, telles que les vignobles et autres cultures fruitières
- les cultures fourragères et les prairies
- les autres cultures telles que le maraîchage, la floriculture et la production de semences.

#### *i. Rôle des prévisions météorologiques*

Les conditions météorologiques jouent un rôle crucial en agriculture car la croissance des végétaux en dépend. La connaissance des conditions météorologiques et du climat ne permet pas forcément de réagir ou de s'adapter, mais les prévisions météorologiques et les projections climatiques sont utiles à tous les horizons temporels. Les prévisions à court et moyen terme sont les plus utilisées par les agriculteurs lorsqu'ils doivent prendre des décisions telles que :

- les dates et l'intensité des apports d'engrais
- les dates et l'intensité des traitements de protection des cultures
- les dates de semis
- les dates de récolte
- la mise en place de protections contre les intempéries (filets anti-grêle, voiles de protection et systèmes de chauffage)
- la mise à l'herbe des animaux d'élevage, etc.

La présente section s'attache à étudier les deux premiers types de décisions de cette liste. En effet, les prévisions météorologiques permettent, parmi d'autres facteurs, d'optimiser les traitements phytopharmaceutiques et les apports d'engrais. Ces derniers sont regroupés sous le terme NPK, N désignant l'azote, P le phosphore et K le potassium, qui sont utilisés pour favoriser la croissance des végétaux. Les produits phytopharmaceutiques, c'est-à-dire les herbicides, les fongicides et les insecticides, sont utilisés pour protéger les plantes des ravageurs.

Pour que les produits phytopharmaceutiques soient efficaces, les traitements doivent être appliqués au bon endroit et au bon moment, en fonction du taux d'humidité du sol, de la température, de l'hygrométrie, des caractéristiques du sol et de la vitesse du vent le jour de l'application et les jours qui suivent. Les conditions d'hygrométrie et de température sont essentielles pour l'absorption des produits par les plantes et, par conséquent, pour l'efficacité du traitement. Selon le fabricant de produits phytopharmaceutiques Bayer, le fait de disposer d'une prévision fiable de la température et de l'humidité à cinq jours est un facteur déterminant pour l'amélioration de l'efficacité des traitements. D'autre part, les produits phytopharmaceutiques peuvent être dispersés par le vent (dérive de pulvérisation). Il est même interdit de pulvériser lorsque le vent dépasse 19 km/h<sup>10</sup>. Toutefois, la dérive de pulvérisation se produit dès 12 km/h. Quant aux engrais, ils peuvent être emportés par de fortes pluies (lessivage) ou par le vent. L'efficacité des produits sur les cultures est donc amoindrie, l'eau et le sol sont pollués et il y a un risque d'eutrophisation de

<sup>9</sup> Source : Agreste.

<sup>10</sup> Arrêté du 4 mai 2017 relatif à la mise sur le marché et à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques.



l'environnement (pollution par les nitrates). L'institut technique agricole Arvalis-Institut du végétal estime qu'il faut, dans les conditions idéales, bénéficier de 15 mm de pluie dans les trois jours qui suivent l'épandage d'un engrais azoté<sup>11</sup>.

Pour éviter l'échec des traitements, il est donc important de disposer de prévisions météorologiques fiables et très localisées. Nos échanges avec des experts des services de Météo-France pour l'agriculture au cours de précédentes missions de Citizing ont confirmé que les prévisions météorologiques sont de plus en plus intégrées aux outils d'aide à la décision destinés aux agriculteurs (par exemple, le GPN Pilot de Total et FARMSTAR développé avec Arvalis). La relation de cause à effet entre l'amélioration des prévisions météorologiques et les impacts environnementaux positifs engendrés par les décisions des agriculteurs semble donc solide.

#### Scénario contrefactuel

**Les agriculteurs français auraient accès aux prévisions météorologiques américaines, c'est-à-dire à des prévisions avec une résolution de 28 km pour le court terme et de 70 km pour le moyen terme. Étant donné qu'ils ont besoin d'anticiper les conditions de précipitations, de températures et de vent au niveau strictement local, ils ne pourraient pas s'appuyer sur les prévisions des services météorologiques américains. Dans ce cas, le scénario contrefactuel revient à supposer qu'il n'existe pas de prévisions météorologiques susceptibles d'aider les agriculteurs dans leur travail.**

Nous avons adopté une stratégie et choisi des hypothèses (présentées à l'Annexe C.1 : Réduction des émissions de GES résultant de l'optimisation des traitements agricoles grâce à l'utilisation des prévisions météorologiques et

<sup>11</sup> <https://www.arvalis-infos.fr/oui-il-faut-15-mm-de-pluie-pour-valoriser-un-apport-d-engrais-azote-@/view-18372-arvarticle.html>.

**Annexe C.2 : Réduction des atteintes à la biodiversité résultant de l'optimisation des traitements agricoles grâce à l'utilisation des prévisions météorologiques**), afin de déterminer l'ordre de grandeur de l'impact des prévisions météorologiques sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la préservation de la biodiversité consécutives à la diminution de la consommation d'engrais et de PPP par les agriculteurs en France. Sur la base des données présentées dans ces annexes, nous considérons que malgré la qualité actuelle des services de prévision de Météo-France, **5 % des traitements (exprimés en masse) échouent**. Dans le scénario contrefactuel, c'est-à-dire **en l'absence de prévisions météorologiques locales, 10 à 30 % des traitements échoueraient**.

❖ **Impact sur les émissions de gaz à effet de serre (voir détails de la méthode de calcul à l'Annexe C.1 : Réduction des émissions de GES résultant de l'optimisation des traitements agricoles grâce à l'utilisation des prévisions météorologiques)**

Sur la base de nos hypothèses, nous constatons que les services de prévision météorologique fournis par Météo-France (avec l'appui d'EUMETSAT) auraient **permis d'éviter de gaspiller chaque année, en moyenne, entre 3,35 kt** (scénario contrefactuel avec 10 % d'échec) **et 16,75 kt** (scénario contrefactuel avec 30 % d'échec) **de produits phytopharmaceutiques** (déversés dans l'environnement en raison de l'échec du traitement). **Ils auraient également permis d'éviter de gaspiller chaque année, en moyenne, entre 110 et 546 kt de produits azotés et entre 9 et 47 kt de produits phosphatés.**

L'échec des traitements a des conséquences sur la productivité des cultures et donc sur les performances économiques des agriculteurs. Pour conserver un niveau équivalent d'efficacité, ces derniers doivent augmenter le nombre de traitements pour compenser les pertes. Par conséquent, un moindre gaspillage d'engrais et de produits phytopharmaceutiques permet, à efficacité constante, d'économiser sur la consommation de ces produits et donc de réduire leur production et leur utilisation, ce qui entraîne une diminution de l'empreinte carbone des activités agricoles. En effet, la production de produits phytopharmaceutiques et d'engrais donne lieu à des émissions relativement importantes lors de la fabrication et après l'épandage<sup>12</sup>. Pour l'azote, le facteur d'émission du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) après épandage pâtit d'un fort degré d'incertitude (entre -80 % et +400 %), car il dépend de plusieurs phénomènes naturels. Mais comme le protoxyde d'azote issu de l'épandage (à travers la décomposition de l'engrais dans le sol) est en général le principal facteur d'émission des engrais, nous présentons quand même l'intervalle de valeurs correspondant à cette marge d'incertitude pour quantifier ce facteur. Les résultats sont les suivants (selon l'hypothèse contrefactuelle de 10 % ou 30 % d'échec des traitements) :

- **Émissions liées aux produits phytopharmaceutiques évitées (totalité du cycle de vie) :**
  - entre 31 et 155 kt de CO<sub>2</sub> par an
  - entre 0,09 et 0,45 kt de CH<sub>4</sub> par an (3 à 13,5 kt éq. CO<sub>2</sub><sup>13</sup>)
  - entre 0,0008 et 0,004 kt de N<sub>2</sub>O par an (0,21 à 1,06 kt éq. CO<sub>2</sub>)
- **Émissions liées aux engrais évitées (fabrication) :**
  - entre 584 et 2 900 kt éq. CO<sub>2</sub>/an pour les produits azotés (ammoniac)
  - entre 5,3 et 26,8 kt éq. CO<sub>2</sub>/an pour les produits à base de phosphore
  - aucune donnée pour les produits à base de potassium
- **Émissions de protoxyde d'azote évitées (après épandage) :**
  - *avec un facteur d'émission faible* : entre 0,46 et 2,3 kt de N<sub>2</sub>O par an (122 à 610 kt éq. CO<sub>2</sub>)
  - *avec un facteur d'émission élevé* : entre 11,5 et 57,4 kt de N<sub>2</sub>O par an (3 048 à 15 211 kt éq. CO<sub>2</sub>)

<sup>12</sup> Émissions de CO<sub>2</sub>, de N<sub>2</sub>O et de CH<sub>4</sub>. La fabrication de produits azotés conduit à l'émission de NH<sub>3</sub> (ammoniac) exprimée ici en éq. CO<sub>2</sub> et leur épandage provoque l'émission de N<sub>2</sub>O (protoxyde d'azote) exprimée dans cette unité et convertie en éq. CO<sub>2</sub>.

<sup>13</sup> Conversion en PRG à 100 ans d'après la base de données de l'Ademe : [https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UUPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?prg.htm](https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UUPLOAD_DOC_FR/index.htm?prg.htm).

Tableau 2 : Résumé des impacts sur la réduction des émissions

Impacts des prévisions météorologiques sur la réduction des émissions (par an)		
<b>Proportion d'échec des traitements</b>		
Situation existante	5 %	
Scénario contrefactuel	Estimation basse 10 %	Estimation haute 30 %
<b>Quantités gaspillées (en kt)</b>		
Produits phytopharmaceutiques	3,35	16,75
Produits azotés	110	546
Produits à base de phosphore	9	47
<b>Émissions (en kt éq. CO2)</b>		
Produits phytopharmaceutiques (totalité du cycle de vie)	34,21	169,56
Ammoniac (fabrication)	584	2 900
Protoxyde d'azote (épandage – facteur d'émission faible)	122	610
Protoxyde d'azote (épandage – facteur d'émission élevé)	3 048	15 211
Phosphore (fabrication)	5,3	26,8
<b>Total des émissions évitées (en kt éq. CO2)</b>	<b>[746 ; 3 672]</b>	<b>[3 706 ; 18 307]</b>
Total des émissions dues aux traitements en France	[14 890 ; 73 268]	

Remarques : les valeurs représentent le différentiel entre le scénario contrefactuel (estimation basse ou haute) et la situation existante pour les variables correspondantes.

La dernière ligne indique le total des émissions dues, en France, à l'utilisation des produits phytopharmaceutiques et des engrais, calculé sur la base des données et facteurs d'émission utilisés dans la présente section.

Les deux dernières lignes dépendent du facteur d'émission du protoxyde d'azote après épandage. Nous avons tenu compte de l'incertitude qui caractérise ce facteur en présentant des résultats correspondant à un facteur « faible » et un facteur « élevé » d'émission.

Source : réalisé par les auteurs

**Bien que les intervalles soient assez larges, ils donnent une idée de l'importance potentielle de l'impact des prévisions météorologiques sur la réduction de la pollution de l'air.**

#### ❖ Impact sur la pollution

L'échec des traitements a également des conséquences sur les sols, la qualité de l'eau et la biodiversité. Par ruissellement, lessivage ou infiltration, les produits phytopharmaceutiques et les engrais peuvent être emportés et polluer les sols, les cultures voisines, les rivières, les lacs, les zones humides et les aquifères, jusqu'aux eaux côtières. **Cette pollution a un impact négatif sur la biodiversité (faune et flore), les rendements agricoles et la santé humaine** (des traces des produits phytopharmaceutiques, toxiques pour l'être humain, se retrouvent dans l'eau et les denrées agricoles que nous consommons). De plus, pendant la pulvérisation, une partie de ces produits peut être emportée par le vent et accroître la pollution de l'air. Les

engrais peuvent aussi être toxiques pour les humains lorsque la concentration en nitrates dans l'eau potable dépasse *50 mg de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/l*.

❖ **Impact sur la biodiversité (voir détails de la méthode de calcul à l'**

❖ **Annexe C.2 : Réduction des atteintes à la biodiversité résultant de l'optimisation des traitements agricoles grâce à l'utilisation des prévisions météorologiques)**

L'un des effets les plus négatifs de l'utilisation intensive des engrais est l'eutrophisation de l'eau. L'eutrophisation se définit comme le processus par lequel une masse d'eau s'enrichit progressivement, en partie ou en totalité, en minéraux et nutriments. L'excès de nutriments, généralement l'azote (surtout pour les eaux côtières) ou le phosphore (surtout pour les eaux douces), stimulent la croissance des algues et des plantes aquatiques, ce qui entraîne une prolifération et une compétition pour la lumière, l'espace et l'oxygène. Cette concurrence accrue peut provoquer la perte d'habitats et une diminution de la diversité des espèces. **Nous considérons que 70 % des engrais azotés se retrouvent dans les milieux aquatiques en cas d'échec des traitements. Sur le fondement de cette hypothèse, un service de prévisions météorologiques précises permettant de diminuer le nombre de traitements inefficaces éviterait qu'entre 76,5 kt et 382 kt d'azote se retrouvent dans les eaux. D'un point de vue écologique, cela signifie que de bonnes prévisions météorologiques permettent d'éviter 11 à 54 PDF.km<sup>3</sup>.an en raison de l'eutrophisation<sup>14</sup>.** Ce résultat peut être interprété de différentes manières. Comme il est trop difficile de prévoir quel scénario pourrait se produire, nous avons décidé d'évaluer trois des possibilités :

- les prévisions météorologiques permettent d'éviter la disparition de toutes les espèces dans un volume de 11 à 54 km<sup>3</sup> d'eaux (eaux douces, eaux côtières, eaux souterraines) en un an ;
- les prévisions météorologiques permettent d'éviter la disparition de 10 % des espèces dans un volume de 110 à 540 km<sup>3</sup> d'eaux en un an ;
- les prévisions météorologiques permettent d'éviter la disparition de 10 % des espèces dans un volume de 11 à 54 km<sup>3</sup> d'eau en 10 ans

Tableau 3 : Résumé des impacts sur la biodiversité

Proportion de traitements inefficaces		Impact des prévisions météorologiques sur la biodiversité (par an)		
Situation existante	Scénario contrefactuel	Produits azotés non gaspillés (kt)	Azote n'aboutissant pas dans l'eau (kt)	PDF évitée (PDF.km <sup>3</sup> .an)
5 %	Estimation basse 10 %	110	76,5	11
	Estimation haute 30 %	546	382	54

Remarque : les valeurs dans les colonnes représentent le différentiel entre le scénario contrefactuel (estimation basse ou haute selon la ligne) et la situation existante pour les variables correspondantes.

Source : réalisé par les auteurs

ii. *Rôle de l'observation de la Terre*

L'observation de la Terre est fondamentale pour obtenir des données utilisables par les services de météorologie pour établir des prévisions. Dans la section précédente, nous avons montré que ces prévisions étaient très importantes pour les agriculteurs car elles leur permettaient de mieux anticiper, afin d'optimiser les apports d'engrais et les traitements phytopharmaceutiques. Toutefois, **l'observation de la Terre a également permis d'aider les agriculteurs grâce à l'apparition de services dédiés utilisant les données recueillies par Copernicus à travers l'Europe et au-delà.** Copernicus est un programme spatial européen géré par l'Union européenne et l'ESA, avec l'assistance technique et scientifique d'EUMETSAT, du CNES et des autres États membres de l'ESA. Ce programme permet d'offrir un accès libre et gratuit à un large éventail de

<sup>14</sup> Nous utilisons l'indicateur PDF (« *potentially disappeared fraction of species* », en français « fraction des espèces susceptibles de disparaître ») qui représente le taux de perte d'espèces (ou, en termes écologiques, le taux d'extinction) sur une certaine surface de terre ou dans un certain volume d'eau pendant une période donnée en raison de conditions défavorables liées à la conversion ou à l'occupation des sols, à une toxicité, une hausse de la température moyenne mondiale ou une eutrophisation.

données utilisées pour le développement de services opérationnels. Comme indiqué dans le paragraphe sur le scénario contrefactuel, nous avons postulé que, sans les subventions publiques versées par la France, le programme Copernicus n'existerait pas encore et que, par conséquent, les services fournis aux agriculteurs sur la base des données de Copernicus n'existeraient pas non plus. Nous étudions donc les impacts environnementaux de Copernicus en termes absolus.

**Copernicus a conduit à l'apparition d'une nouvelle génération de capteurs satellitaires de haute résolution spatiale et temporelle et a représenté une avancée majeure pour le développement de services dédiés à l'agriculture de précision** tels que des recommandations pour l'apport de différents intrants (engrais, régulateurs de croissance, etc.) sous forme de cartes construites à partir d'images satellitaires. Certains de ces services existaient déjà avant le lancement de Copernicus mais ils utilisaient des données payantes de la mission française SPOT ou des images en accès libre de moins bonne résolution provenant des missions Landsat américaines (15 à 120 m au lieu de 10 à 20 m pour Sentinel-2), complétées par des données collectées par les avions. Lancés en 2015 et 2017, les satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B disposent d'un capteur d'imagerie multi-spectrale innovant à large bande et haute résolution avec 13 bandes spectrales, qui offre une nouvelle perspective de nos sols et de la végétation<sup>15</sup>. Avec sa caméra multi-spectrale et une largeur de fauchée de 290 km, la mission Sentinel-2 assure non seulement la continuité avec la mission française Spot et la mission américaine Landsat, mais améliore également la qualité de leurs données. En d'autres termes, Copernicus a apporté une précision accrue et une meilleure fiabilité des données d'observation de la Terre, avec une fréquence de revisite élevée (5 jours).

Les satellites Sentinel-2 peuvent observer le couvert végétal, le niveau de la biomasse ainsi que la lumière solaire réfléctée par la végétation (procédé par télédétection)<sup>16</sup>. Une fois que les données recueillies ont été retraitées au niveau de la parcelle et couplées avec les modèles agronomiques (caractéristiques de la culture, prévisions météorologiques, etc.), il devient possible de définir les paramètres biophysiques d'un champ, puis d'obtenir des cartes de couverts végétaux et de calculer des indices tels que l'indice foliaire (ou LAI, *Leaf Area Index*) ou l'indice de chlorophylle<sup>17</sup>. **Ce dernier est particulièrement utile pour détecter le manque d'azote des plantes d'une parcelle.** En effet, puisque l'azote est un composant de la chlorophylle, en mesurant cette dernière on mesure de façon indirecte la quantité d'azote dans la plante. Ceci permet une programmation plus efficace des apports d'engrais. **Le contrôle du niveau de biomasse d'un champ est également particulièrement utile pour déterminer les zones et les moments où il est nécessaire d'appliquer des engrais, mais aussi des produits phytopharmaceutiques, puisque cet indicateur permet de repérer les parties de la parcelle atteintes par des maladies.**

Bien que les services utilisant les données de Copernicus diffèrent des services de prévision météorologique, **ils engendrent des impacts environnementaux semblables car ils contribuent à l'optimisation des traitements agricoles. En appliquant les engrais et les produits phytopharmaceutiques sur des zones spécifiques définies grâce aux informations transmises par les satellites au lieu de les appliquer sur la totalité du champ, les agriculteurs peuvent réduire le volume de leurs traitements.** Par exemple, lors d'essais de terrain de grande ampleur menés en Allemagne pendant cinq ans, Yara (grand distributeur de nutriments pour végétaux) a montré que la fertilisation contrôlée à l'aide de capteurs conduisait, en moyenne, à une diminution des apports d'azote de 12 % par rapport à une application uniforme<sup>18</sup>.

De même que dans l'analyse des activités de prévision météorologique, on peut conclure que **cette réduction des volumes d'engrais et de produits phytopharmaceutiques obtenue grâce au programme Copernicus a certainement été bénéfique pour le climat, la qualité des sols et des cours d'eau, et la biodiversité, car la**

<sup>15</sup> Article « Success Stories of ESA » : <https://sentinel.esa.int/web/success-stories/-/copernicus-sentinel-2-leads-precision-farming-into-new-era>.

<sup>16</sup> La télédétection est le procédé qui consiste à détecter et contrôler les caractéristiques physiques d'une zone en mesurant à distance ses rayonnements émis ou réfléchis (en général depuis un satellite ou un avion).

<sup>17</sup> La chlorophylle est le pigment vert qui permet aux plantes de réaliser la photosynthèse, processus qui utilise la lumière du soleil pour convertir le dioxyde de carbone et l'eau en éléments de base de leur matière organique.

<sup>18</sup> « L'agriculture de précision pour une agriculture durable », fiche d'information Yara (en anglais) : <https://www.yaraagri.cz/globalassets/country-websites/campaign-assets/nbs-campaign/sub-pages/profit-page/crop-performance/pure-nutrient-fact-3-precision-farming.pdf/>.

production et l'application d'engrais et de produits phytopharmaceutiques conduit à l'émission de GES, à la pollution des cours d'eau et des sols, et à l'eutrophisation des eaux.

Étant donné sa complexité et son caractère très indirect (expliqués dans la section Difficultés de l'évaluation), la contribution du programme Copernicus à ces impacts environnementaux serait trop difficile à quantifier. Toutefois, nous présentons l'exemple d'un service utilisant les données de Copernicus pour aider les agriculteurs dans leurs opérations de traitement.

### Étude de cas : plateforme BELCAM pour une gestion intelligente de la fertilisation azotée (Belgique)

Figure 9 : Plateforme BELCAM pour les agriculteurs



Source: ESA

BELCAM est une plateforme collaborative qui s'appuie sur l'observation de la Terre pour fournir aux pouvoirs publics et aux agriculteurs belges des informations pour la gestion des cultures, issues conjointement des observations sur le terrain et des données satellitaires du programme Copernicus. Financée par le programme STEREO, la plateforme belge BELCAM (Belgian Collaborative Agriculture Monitoring) a été créée pour rendre disponible, pertinente et utilisable par tous les agriculteurs belges la richesse des informations satellitaires, afin d'aider ces derniers à répondre aux attentes

de la société. **L'application des bonnes doses d'engrais azotés, au bon moment et au bon endroit, contribue à leur pleine absorption par les plantes et minimise considérablement leur impact sur l'environnement** et leur empreinte carbone associée, tout en améliorant les revenus des agriculteurs.

La plateforme BELCAM, représentée ci-dessus, contribue à la gestion intelligente de l'azote dans les cultures de froment d'hiver, de pomme de terre et de maïs en Belgique, en transmettant aux utilisateurs des recommandations fondées sur les données satellitaires, à l'échelle de la parcelle. Il s'agit notamment d'informations telles que le statut azoté de la culture, l'indice de nutrition azotée (NNI, *Nitrogen Nutrition Index*), qui détermine le niveau de nutrition de la culture, et la quantité d'engrais à apporter<sup>19</sup>. Ces informations sont obtenues à partir des indices de réflectance et de végétation fournis par Sentinel-2 (disponibles tous les 5 jours), qui permettent d'estimer l'azote absorbé par les cultures, le niveau de biomasse et l'indice foliaire.

L'image de droite montre le statut azoté de cultures de froment d'hiver en Belgique en mai 2017, calculé d'après le Les zones blanches sont des champs où une fertilisation est nécessaire (NNI < 0,7), tandis que les zones rouges sont celles reçu un excès d'engrais (NNI > 1).

**Ce service offre un potentiel important de réduction de la consommation d'engrais et, par conséquent, des dommages à l'environnement qui en découlent.** Toutefois, d'autres données que celles de Sentinel ont également été utilisées mettre en place ce service (prévisions météorologiques, de terrain, modélisation des caractéristiques des cultures, retours des utilisateurs, etc.). La plateforme a d'abord fonctionné comme projet pilote pendant quatre ans, jusqu'en 2019, et son utilisation opérationnelle continue de s'accroître graduellement. **La présente étude illustre la contribution que le programme Copernicus peut apporter pour améliorer les pratiques agricoles et l'environnement.**

Figure 10 : Exemple de carte d'indice de nutrition azotée



Source : ESA

NNI.

qui ont

sur

pour données

<sup>19</sup> « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (« L'utilisation croissante de Copernicus à travers différentes régions d'Europe ») (2018). Rapport de la Commission européenne et de l'ESA.

Des services visant à mettre en place une agriculture de précision grâce aux données de Copernicus ont déjà été développés dans plusieurs pays européens et non-européens, et certains ont déjà montré des résultats prometteurs. Par exemple, le projet Gaiasense (en Grèce), qui proposait la fourniture de services d'agriculture intelligente, a montré, après deux années, que la consommation d'engrais et de produits phytopharmaceutiques avait diminué d'environ 19 %<sup>20</sup>. D'autres projets semblables d'applications utilisant les données de Copernicus ont été développés, tels que FARMSTAR<sup>21</sup> (France), EUGENIUS (Italie), CropSAT (Danemark), FruitLook (Afrique du Sud), etc.

**Dans cette section, nous avons montré que les prévisions météorologiques et l'observation de la Terre sont des outils complémentaires pour améliorer la gestion des traitements agricoles. Bien que les services d'agriculture de précision basés sur l'observation de la Terre soient encore en développement, nous observons déjà, en divers endroits, des résultats prometteurs sur la diminution des impacts environnementaux négatifs de l'utilisation des engrais et produits phytopharmaceutiques dans les activités agricoles.**

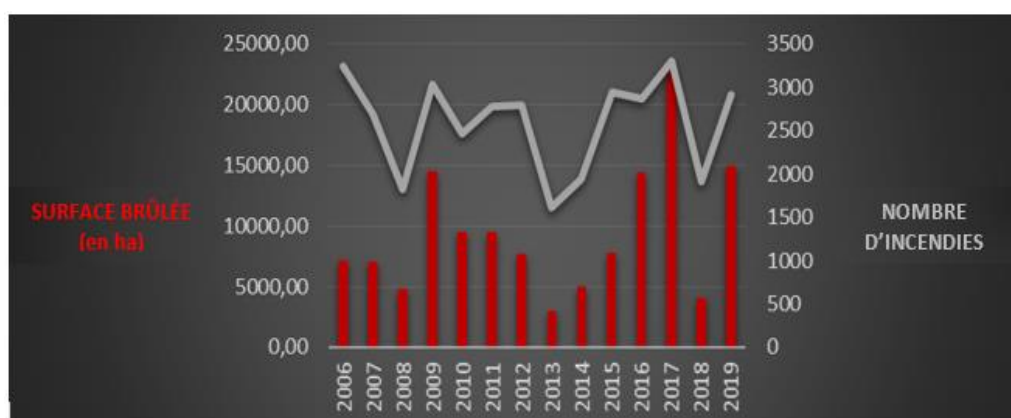
## B. Prévention et contrôle des feux de forêt et de leurs conséquences

### i. Rôle des prévisions météorologiques

L'un des phénomènes liés à la sécurité des personnes et des biens, pour Météo-France, est celui des feux de forêt. La France est le quatrième pays d'Europe le plus boisé, avec 16,9 millions d'hectares de forêts en métropole. La taille de ses zones forestières la rend vulnérable au risque d'incendie de forêt, particulièrement en été. Les incendies ont un impact très important sur les zones naturelles, détruisant tout ou partie des espèces végétales et animales sur leur passage et libérant également une grande quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. En 2019, environ 6 735 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> ont été relâchées dans l'atmosphère en raison des incendies de forêt dans le monde, selon le service de surveillance de l'atmosphère du programme européen Copernicus, c'est-à-dire plus que les émissions totales des États-Unis pour cette même année (5 100 millions de tonnes).

Depuis les quarante dernières années, **on observe une diminution de la surface brûlée par les incendies**. Sur la période 1976-1990, en France, la surface moyenne brûlée était de 45 000 hectares (Chatry *et al.*, 2010). Sur la période 2006-2019, une moyenne annuelle de 2 593 feux a détruit en moyenne 9 485 hectares de forêt par an (source : données de la BDIFF pour la France métropolitaine et l'île de la Réunion).

Figure 11 : Évolution des incendies de forêt en France sur 15 ans



Source : BDIFF France

<sup>20</sup> « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). Rapport de la Commission européenne et de l'ESA.

<sup>21</sup> <https://sentinel.esa.int/web/success-stories/-/copernicus-sentinel-2-leads-precision-farming-into-new-era>.



Remarque : l'histogramme rouge représente la surface brûlée portée sur l'axe de gauche, et la courbe en gris représente le nombre d'incendies porté sur l'axe de droite.

Pendant cette dernière période, la plupart des incendies sont survenus dans la zone méditerranéenne (moyenne annuelle de 1 720 incendies, détruisant 6 748 hectares, selon la base de données Prométhée), ce qui représente plus de 71 % de la surface moyenne brûlée annuellement. Bien que le risque soit très fortement lié aux caractéristiques de la végétation, les **conditions météorologiques** (sècheresse, température et vent) **ont également une grande influence sur la sensibilité de la végétation au feu, et à sa propagation** une fois qu'il a démarré. Qu'ils soient d'origine naturelle (par exemple causés par la foudre) ou humaine (comme c'est le cas pour 90 % des départs de feu<sup>22</sup>, que ce soit du fait d'une activité économique – chantiers de BTP, activités agricoles – ou d'une activité du quotidien – mégots de cigarettes, barbecues, etc.), l'étendue de l'incendie dépend en grande mesure des conditions météorologiques.

Pendant la dernière décennie (2010-2019), Météo-France a gagné en précision avec ses deux nouveaux supercalculateurs déployés en 2014 et améliorés en 2016. Leur déploiement initial en janvier 2014 a accru la puissance réelle du système de calcul d'un facteur 12 par rapport à la précédente configuration, avec une puissance totale d'un pétaflop, soit un million de milliards d'opérations par seconde. Depuis 2016, de nouvelles avancées ont permis d'accroître la puissance maximale à plus de 5 pétaflops. Au-delà des progrès technologiques enregistrés dans la prévision, Météo-France participe activement au dispositif national de surveillance et de prévision des feux de forêt, sous la responsabilité de la DGSCGC (direction générale de la sécurité civile et de la gestion des crises). Météo-France fournit aux services de la sécurité civile des cartes expertisées de danger météorologique d'incendie, des données météorologiques et des indices spécifiques, dont une carte de l'indice forêt météo (IFM). Cet indice est calculé suivant une méthode canadienne à partir de données météorologiques : pluviométrie, température, hygrométrie, vent, etc. Les prévisions météorologiques sont très localisées puisqu'elles sont fournies par Météo-France à l'aide du modèle AROME qui dispose d'une haute résolution pour des prévisions à très court-terme (1,3 km). De plus, chaque été, des prévisionnistes de Météo-France sont détachés auprès des autorités qui coordonnent la lutte contre les feux de forêt depuis les centres opérationnels de Marseille et Bordeaux. Leur assistance est cruciale à la fois pour le court et le moyen terme. **Les prévisions météorologiques à 72 heures sont une information indispensable pour mettre en œuvre les plans de lutte contre les incendies** (par exemple, le transfert des hélicoptères, des avions bombardiers d'eau, des pompiers et des équipements) et pour mieux contrôler les départs de feu et les incendies en cours. **Les prévisions à une ou deux semaines sont également importantes car elles permettent de mieux anticiper l'évolution du risque d'incendie pour que la sécurité civile puisse prendre des décisions stratégiques**, comme le repositionnement des moyens humains et matériels dans les zones les plus à risque, afin de mieux contrôler les incendies en cours et de mieux anticiper les nouveaux départs de feu.

Toutefois, bien que la sécurité civile s'appuie sur les prévisions météorologiques, ses services se sont également améliorés ces dernières décennies et ses actions sont devenues de plus en plus efficaces. De plus, des actions de prévention complètent les actions de lutte et ont certainement contribué à la réduction des incendies de forêt au cours des quarante dernières années. Nous pouvons citer notamment trois actions complémentaires de prévention<sup>23</sup> :

- les campagnes d'information et de sensibilisation des citoyens ;
- la défense de la forêt contre l'incendie, pilotée par l'Office national des forêts (ONF), qui repose sur une politique globale d'aménagement et d'entretien de l'espace rural et forestier ;
- le contrôle de l'utilisation des sols et la mise en place de plans de prévention des risques d'incendie de forêt (introduits en 1995, ces plans ont pour objectif de contrôler l'interface forêt-habitat et

<sup>22</sup> Source : Feux de forêt. Les prévenir et s'en protéger (2020). Ministère de la transition écologique. Basé sur les statistiques de la sécurité civile.

<sup>23</sup> Source : <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/prevention-du-risque-1>.

d'éviter les implantations qui pourraient provoquer des incendies et seraient difficiles à protéger une fois l'incendie déclaré).

#### Scénario contrefactuel

**La sécurité civile aurait accès aux prévisions météorologiques américaines, c'est-à-dire à des prévisions avec une résolution de 28 km pour le court terme et de 70 km pour le moyen terme. Étant donné l'importance de connaître les conditions météorologiques pour anticiper les zones à risque, généralement transmises sous forme de cartes de risque, la sécurité civile ne pourrait pas s'appuyer sur les prévisions des services météorologiques américains. Dans ce cas, le scénario contrefactuel revient à supposer qu'il n'existe pas de prévisions météorologiques susceptibles d'aider la sécurité civile dans ses actions.**

Nous avons pour objectif de fournir un ordre de grandeur de l'impact des prévisions météorologiques sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette stratégie (décrite à l'

**Annexe C.3 : Réduction des émissions de GES résultant d'une optimisation de la gestion des feux de forêt grâce à l'utilisation des prévisions météorologiques)** consiste à comparer les surfaces brûlées entre la situation existante (sur la période 2010-2019) et le scénario contrefactuel (sur la période 1976-1990, corrigée de l'accroissement du couvert forestier, de l'augmentation du risque climatique et des progrès de la gestion forestière et des moyens de la sécurité civile). Cette analyse repose donc sur le postulat que le différentiel de surface brûlée est diminué de 30 % grâce à l'amélioration de la gestion forestière et des moyens de la sécurité civile. Bien que nous n'ayons aucune certitude sur ce postulat étant donné que nous ne disposons pas de données à ce sujet, **l'analyse permettra d'obtenir un ordre de grandeur intéressant de l'impact des activités de prévision météorologique. Les résultats doivent cependant être pris avec précaution** car ils reposent sur cette hypothèse incertaine. Afin de mesurer ce degré d'incertitude, nous effectuons des tests de sensibilité, présentés ci-après, et choisissons de présenter une fourchette de valeurs.

Sur la période 2010-2019, la moyenne annuelle de surface forestière brûlée était de 11 805 ha (données de la DGSCGC reprises dans un rapport du Sénat<sup>24</sup>). Par conséquent, sur la base de notre stratégie (voir annexe), nous estimons que les subventions publiques allouées aux activités de prévision météorologique permettent d'éviter en moyenne chaque année environ **32 000 hectares**<sup>25</sup> de surface forestière brûlée, par comparaison avec une situation dans laquelle Météo-France n'existerait pas et la France n'aurait accès qu'au modèle américain GFS.

❖ **Impact sur les émissions de GES (voir détails de la méthode de calcul à l'**

---

<sup>24</sup> Source : [http://www.senat.fr/rap/r18-739/r18-739\\_mono.html](http://www.senat.fr/rap/r18-739/r18-739_mono.html).

<sup>25</sup> (58 000 ha – 11,805 ha) x 70 % (70 % étant la part de diminution due aux prévisions météorologiques).

### ❖ Annexe C.3 : Réduction des émissions de GES résultant d'une optimisation de la gestion des feux de forêt grâce à l'utilisation des prévisions météorologiques)

Les zones forestières épargnées par les incendies représentent un bénéfice pour la société grâce aux coûts financiers et humains évités. Du point de vue de l'environnement, la diminution des surfaces brûlées obtenue grâce aux prévisions météorologiques s'accompagne également d'une **diminution des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère**. Sur le fondement de nos hypothèses et de la littérature, nous concluons que les activités météorologiques des dix dernières années ont pu éviter l'émission dans l'atmosphère d'environ **1 518 kt de CO<sub>2</sub> par an**, par comparaison avec une situation où le niveau de prévision serait dégradé et presque équivalent à celui de la période 1976-1990.

Nous observons toutefois que ce résultat est très sensible au postulat, posé dans le scénario contrefactuel, d'une diminution des surfaces brûlées rendue possible grâce à l'amélioration de la gestion forestière et des moyens de la sécurité civile :

Tableau 4 : Test de sensibilité et fourchette de valeurs estimées de l'impact des prévisions météorologiques sur les émissions dues aux incendies de forêt

Part indépendante des prévisions météorologiques (scénario)	Impact expliqué par les prévisions météorologiques		
	Diminution des surfaces brûlées par an, en ha	Diminution des émissions, en kt de CO <sub>2</sub>	Diminution des émissions de CO <sub>2</sub> , en %
30 % (valeur de référence)	32 229	1 518	0 %
Faible : 10 %	41 437	1 952	29 %
Élevée : 50 %	23 020	1 084	-29 %
Extrême : 90 %	4 604	217	-86 %

Remarques : la première colonne représente la part de la diminution de la surface brûlée entre 1976-1990 et 2010-2019 qui s'explique par une meilleure gestion forestière et l'amélioration des moyens de la sécurité civile. Nous testons quatre scénarios avec des parts différentes. La deuxième et la troisième colonne représentent le différentiel entre le scénario contrefactuel et la situation existante. La dernière colonne est la variation des émissions de CO<sub>2</sub> évitées par comparaison avec la valeur de référence (par exemple, 29 % signifie qu'il y a 29 % d'émissions évitées en plus lorsque 90 % de la diminution des surfaces brûlées sont attribuables aux prévisions météorologiques, au lieu de la valeur de référence de 70 %).

Source : réalisé par les auteurs

Le scénario extrême est peu vraisemblable étant donné que l'amélioration de la qualité des prévisions météorologiques a joué un rôle fondamental dans la diminution du nombre d'incendies sur 40 ans et dans l'appui à la gestion forestière (grâce aux projections climatiques) et aux actions de la sécurité civile. Les scénarios faible et élevé sont plus fiables et représentent les valeurs extrêmes du paramètre qui rend compte de la contribution de la gestion forestière et de la sécurité civile. **Par conséquent, nous pouvons conclure que les émissions de CO<sub>2</sub> évitées grâce aux services de prévision météorologique tels que nous les connaissons aujourd'hui se situent entre 1 084 et 1 952 kt de CO<sub>2</sub> par an.**

Sur le long terme, lorsque les arbres brûlés repoussent, le carbone relâché est de nouveau séquestré. Toutefois, ce processus est très long, et il peut se passer des décennies avant que cela ne soit le cas. De plus, le nombre croissant d'incendies de forêt ralentira la repousse. Des recherches actuelles montrent que même dans un environnement où une repousse importante est possible, environ 10 % du CO<sub>2</sub> reste dans l'atmosphère après séquestration (Johns, 2020). En d'autres termes, même après séquestration d'une année de carbone émis lors des incendies (ce qui peut prendre plusieurs décennies), environ 152 kt de CO<sub>2</sub> peuvent rester dans l'atmosphère et accroître le réchauffement climatique. Cela dit, cette part de carbone séquestré est aussi sujette à caution, car elle dépend fortement des caractéristiques de la forêt et de la vitesse de repousse.

### ❖ Impact sur l'adaptation au changement climatique

Bien que l'impact ne puisse être entièrement attribué aux prévisions météorologiques, puisque l'ONF a également amélioré la gestion forestière en ce qui concerne la prévention des incendies, nous devons garder en tête que la prévention de long terme, par exemple la gestion forestière et les campagnes de sensibilisation, repose sur la connaissance que nous avons du réchauffement climatique et de l'évolution du risque d'incendie dans certaines zones. En d'autres termes, les projections climatiques aident certains preneurs de décisions tels que l'ONF à mieux comprendre quelles sont les zones à risque et où des mesures sont nécessaires et, plus important, quelles seront les zones à risque à l'avenir<sup>26</sup>. Par conséquent, les projections climatiques jouent un rôle fondamental dans l'adaptation des forêts et des comportements humains. Dans le scénario contrefactuel, nous aurions connaissance de l'accroissement du risque d'incendie sans savoir dans quelles régions de France cet accroissement se produirait, ce qui rendrait les mesures de prévention moins efficaces.

#### ❖ Impact sur la pollution

**La protection de certaines zones contre les incendies s'accompagne d'autres impacts environnementaux que nous ne pouvons pas quantifier.** Tout d'abord, elle permet de **réduire la pollution de l'air par les fumées**. Il est difficile d'évaluer cette diminution parce qu'elle dépend des conditions météorologiques et des types de végétation. Certaines études ont cherché à mesurer les émissions de particules et d'autres polluants (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COVT, HCl, HAP, PCB, PCDD/DF, I.TEQ) à l'aide d'essais ou à partir d'études de cas (Ineris, 2004 ; Anses, 2012) en g par kg de biomasse brûlée, mais ces mesures restent très dépendantes du contexte (influencées par les conditions météorologiques, la topographie, le type de combustible...) et il n'existe pas en France de données concernant les différents types spécifiques de biomasse qui ont brûlé<sup>27</sup>. Toutefois, il est vraisemblable qu'une diminution des surfaces brûlées pourrait réduire l'impact de la pollution sur la qualité de l'air et sur la santé, parfois réellement affectées par les incendies. Par exemple, un incendie de végétation survenu en 2009 au sud-est de Marseille a provoqué une augmentation ponctuelle de la pollution de l'air amenée par le vent. Une augmentation des PM10 et des PM2,5 a été observée. À la station de la Timone, les PM10 sont passées de 52 µg/m<sup>3</sup> en moyenne avant l'incendie, à 158 µg/m<sup>3</sup> durant l'incendie, atteignant une concentration horaire maximale de 302 µg/m<sup>3</sup><sup>28</sup>, alors que l'OMS recommande une moyenne sur 24 heures de 45 µg/m<sup>3</sup><sup>29</sup>.

#### ❖ Impact sur la biodiversité

**Les prévisions météorologiques permettent aussi d'éviter certains dommages à la biodiversité** dans les zones épargnées par les incendies : animaux tués (surtout les reptiles et les animaux qui ne peuvent s'enfuir aisément) ; habitats et sources d'alimentation détruits, ce qui provoque la mort des animaux ; dégradation du couvert végétal, qui peut conduire à un ruissellement et des risques d'érosion accrus ; hausse des risques d'érosion causée par l'accumulation de cendres au sol, ce qui empêche la pluie de pénétrer (dans les sentiers en pente, le ruissellement augmente, ce qui provoque de l'érosion et peut entraîner des glissements de terrain) et perte de composants minéraux comme l'azote, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur les sols.

#### ii. Rôle de l'observation de la Terre

Tandis que les prévisions météorologiques sont particulièrement utiles pour évaluer les risques d'incendies de forêt et leur évolution potentielle selon les conditions météorologiques, **l'observation de la Terre par les missions Sentinel du programme Copernicus se révèle un outil d'assistance précieux pour les pompiers et**

<sup>26</sup> Par exemple, une carte des risques produite par Météo-France montre qu'à l'avenir, les forêts du Nord de la France seront de plus en plus exposées aux incendies en raison du changement climatique.

<sup>27</sup> Ceci est important car, par exemple, un feu de feuillages ou d'herbes (feu à combustion lente) produit des émissions de polluants organiques et de particules plus fortes qu'un feu de branchages (feu à combustion vive).

<sup>28</sup> Voir <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2010sa0183Ra.pdf> : données non publiées, transmises à l'Anses par l'Atmo PACA (Association agréée de surveillance de la qualité de l'air de la région PACA).

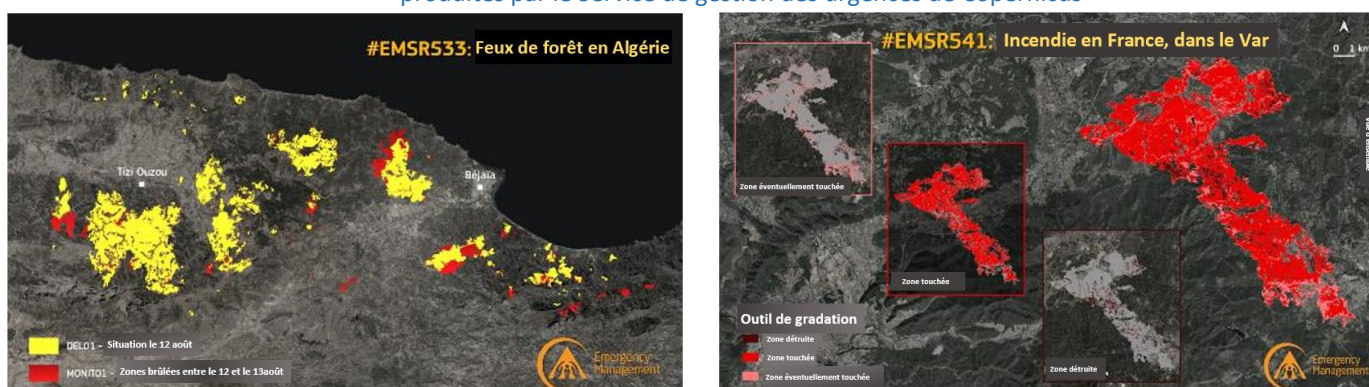
<sup>29</sup> [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/WHO-Air-Quality-Guidelines?language=en\\_US#:~:text=The%20updated%20recommended%20guideline%20levels,m3%20%2Dhour%20mean.](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/WHO-Air-Quality-Guidelines?language=en_US#:~:text=The%20updated%20recommended%20guideline%20levels,m3%20%2Dhour%20mean.)

les gestionnaires forestiers car elle contribue à la détection des feux, à la délimitation de l'étendue des surfaces brûlées et à l'évaluation des dommages après l'incendie.

L'arrivée des satellites à haute résolution a rendu possible le développement d'outils d'aide à la lutte contre les incendies de forêt et leurs conséquences. En particulier, Sentinel-2 fournit des données à large spectre et haute résolution (jusqu'à 10 m) avec une fréquence de revisite élevée (environ 5 jours et même moins selon la latitude) ce qui permet de détecter les incendies (en capturant la lumière qu'ils émettent) et leur degré de gravité (en percevant l'absence de réflexion de la lumière par la chlorophylle de la végétation dans les zones brûlées). La mission Sentinel-1 peut également être utile pour compenser les difficultés des satellites Sentinel-2 (perturbation par les nuages) grâce à son radar à synthèse d'ouverture (RSO). D'un autre côté, Sentinel-2 compense les difficultés rencontrées par Sentinel-1 (sensibilité à l'humidité du sol). Sur la base des données recueillies par Sentinel-1 et Sentinel-2 combinées avec d'autres données spatiales (notamment celles des satellites américains Terra et Aqua<sup>30</sup>), des données in-situ et des algorithmes, la Commission européenne a développé, dans le cadre du service de gestion des urgences de Copernicus, un service gratuit spécifiquement dédié aux incendies de forêt. Cette catégorie de services (Copernicus EMS) comporte deux composants :

- un composant cartographie dénommé Service Copernicus de gestion des urgences – cartographie ;
- un composant alerte rapide comprenant trois systèmes différents pour la prévention des inondations, des sécheresses et des incendies. **Ce dernier système, dénommé Système européen d'informations sur les feux de forêt (EFFIS), fournit à la fois des informations et diverses cartes, dont des cartes d'étendue des surfaces brûlées et des cartes de gradation des dommages** comme le montrent les images ci-dessous. Le *Global Wildfire Information System (GWIS)*, initiative conjointe du GEO<sup>31</sup> et des programmes Copernicus, complète l'EFFIS, mais au niveau mondial.

Figure 12 : exemples de cartes d'étendue des surfaces brûlées et de gradation des dommages des incendies produites par le Service de gestion des urgences de Copernicus



Vue d'ensemble de l'évolution de feux de forêt entre le 12 et le 13 août en Algérie (image de gauche) et carte des dommages après un incendie en France (image de droite)<sup>32</sup>

L'image de gauche montre l'évolution de feux de forêt en Algérie avec, en jaune, les zones brûlées au 12 août et, en rouge, les zones brûlées entre le 12 et le 13 août. Cette carte peut être particulièrement utile pour les pompiers car elle leur permet de détecter les départs de feu grâce aux informations quasiment en temps réel transmises par Copernicus et d'observer ensuite l'évolution de l'incendie pour prendre les décisions adéquates pour le combattre. Les données collectées par les satellites peuvent compléter le travail souvent dangereux de cartographie aérienne réalisé par des capteurs spéciaux embarqués à bord d'avions qui volent la nuit au-dessus des flammes. L'image de droite montre les dommages consécutifs à un incendie en France, avec une distinction entre les zones détruites, les zones touchées et les zones éventuellement touchées. Ces

<sup>30</sup> Les satellites Terra et Aqua disposent d'un capteur MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*, spectroradiomètre d'imagerie à résolution modérée) capable de détecter les anomalies de température, mais leur résolution (250 m maximum) est inférieure à celle des Sentinel-2.

<sup>31</sup> Le Groupe sur l'observation de la Terre (GEO) est une organisation intergouvernementale (composée de plus de 100 pays) qui vise à améliorer l'accès aux données d'observation de la Terre, leur disponibilité et leur utilisation.

<sup>32</sup> Source : <https://www.copernicus.eu/en/news/news/observer-unprecedented-mobilisation-copernicus-ems-during-2021-mediterranean-wildfire>.

informations peuvent être exploitées par les autorités publiques chargées de la restauration des zones brûlées pour engager en priorité les actions les plus urgentes.

Les impacts environnementaux des données de Copernicus utilisées pour la détection des incendies et la surveillance de leur évolution sont semblables à ceux que nous avons présentés plus haut à propos des activités de prévision météorologique. En effet, **les données spatiales peuvent fournir des informations très utiles pour renforcer l'efficacité de l'action des pompiers, ce qui conduit sans aucun doute à une réduction du nombre d'hectares de forêt brûlés en comparaison avec une situation dans laquelle aucune donnée d'observation de la Terre ne serait disponible.** Éviter que des hectares de forêt brûlent en arrêtant l'incendie plus tôt est primordial pour réduire les émissions de GES, la pollution de l'air par la fumée et les dommages importants causés à la biodiversité. Bien sûr, le programme Copernicus ne permet pas d'éviter les incendies de forêt et leurs conséquences terribles, surtout pendant l'été, mais il semble être devenu **un outil d'aide précieux, qui fournit les informations nécessaires pour détecter les incendies et contrôler leur évolution plus rapidement que lorsque ces données sont collectées au sol, en particulier sur des terrains difficiles.** Comme les incendies peuvent se propager très vite, l'obtention rapide d'informations peut être déterminante pour sauver des flammes certaines zones. De plus, **les données de Sentinel-2 peuvent aider à repérer les zones brûlées, à en évaluer l'étendue et à mesurer la gravité des dégâts après l'incendie à une échelle très fine. Ces informations permettent de tracer rapidement une carte précise des zones brûlées, essentielle pour élaborer à la fois des mesures à court terme de restauration de l'écosystème et des mesures de prévention directes susceptibles d'atténuer les éventuels impacts de l'incendie.** Ces mesures, mises en œuvre par les forestiers (comme le boisement ou la couverture des sols par des feuillages ou autres végétaux), améliorent l'infiltration des eaux de ruissellement, ce qui freine l'érosion des sols et protège leur fertilité, améliore la qualité des eaux, et a des effets positifs sur la biodiversité et les habitats.

**La contribution des données de Copernicus à la détection des incendies et à la mesure de leur gravité est très difficile à quantifier car, d'une part, elle peut dépendre de la qualité du service opérationnel concerné et, d'autre part, ces données ne sont pas les seules sources d'assistance accessibles aux pompiers et forestiers.** La contribution de l'observation de la Terre à la détection des incendies a commencé à être reconnue et étudiée avant que le programme Copernicus ne devienne opérationnel avec ses satellites Sentinel, par exemple avec le spectroradiomètre d'imagerie à résolution modérée (MODIS) développé par la NASA (Giglio *et al.*, 2003). Le système américain d'imagerie visible et infrarouge VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) embarqué sur le satellite Suomi, qui dispose d'une résolution de 375 m, s'est également avéré efficace pour la détection des incendies, avec un taux moyen d'erreur de commission (faux positifs) de 1,2 % (Schroeder *et al.*, 2014). Bien que Sentinel-2 ne puisse détecter les points chauds, il dispose d'une résolution spatiale plus élevée qui apporte plus de précisions sur les zones de départ d'incendies (jusqu'à 10 m contre 250 m pour MODIS et 375 m pour VIIRS). Après l'incendie, l'imagerie de télédétection semble avoir une efficacité variable, la fiabilité variant en fonction de la résolution des satellites, des algorithmes utilisant les données spatiales (Barbosa *et al.*, 1999 ; Giglio *et al.*, 2009 ; Roy *et al.*, 2005), et de la complexité de la zone observée. Par exemple, l'hétérogénéité de la savane provoque une hétérogénéité des modifications spectrales dues aux incendies. (Pereira, 2003). **Les images produites par Sentinel-2 ont prouvé leur utilité pour la cartographie des zones brûlées** (Weirather *et al.*, 2018). En étudiant le feu de végétation survenu dans la Sierra del Gata, en Espagne, pendant l'été 2015, Colson *et al.* (2018) ont montré que les données de Sentinel-2 traitées avec une machine à vecteurs de support SVM (algorithme) permettaient d'obtenir une carte très précise des zones brûlées, avec une précision de 99,38 %. En ce qui concerne l'évaluation de la gravité des incendies, les mêmes auteurs ont montré que le traitement par SVM à partir de données à la fois optiques (Sentinel-2) et radar (Sentinel-1) était une approche très efficace de mesure, avec une précision globale de 92,97 %.

Outre les services de Copernicus proposés par la Commission européenne, **d'autres acteurs ont développé leurs propres services à partir des données des satellites Sentinel pour aider à la détection des incendies et au suivi des dommages**, en particulier dans les pays méditerranéens où le risque d'incendie est le plus élevé en Europe. Une entreprise norvégienne, notamment, propose un service dénommé Silvisense pour détecter

rapidement l'apparition de problèmes dans les forêts (ravageurs, tempêtes, incendies, utilisation des sols). En Italie, le service Rheticus offre une information hebdomadaire sur les zones brûlées par les feux de végétation et la gravité des incendies dans le parc national d'Alta Murgia, et aide les autorités publiques locales à « surveiller et répertorier les incendies et contribuer à la gestion des incendies et aux plans de restauration en fournissant des informations pratiques sur les zones brûlées »<sup>33</sup>. En Grèce, l'observatoire national des incendies de forêt (NOFFi) a développé, à partir des données de Sentinel-2, un service de cartographie rapide des zones brûlées à la suite d'un incendie, tout d'abord sur une base pré-opérationnelle en 2016, mais qui a vite été largement utilisé pour cartographier, en 2017, les zones atteintes par 97 feux de végétation en Grèce (plus de 20 000 hectares) et deux entre l'Albanie et la Grèce<sup>34</sup>. La même année, l'arrivée de Sentinel-2B a permis au service grec de sortir des cartes en moyenne 6 à 7 jours après le début d'un incendie, devenant ainsi très utile au ministère de l'environnement et de l'énergie, comme le confirmait Antonios Kapetanios<sup>35</sup> : « Le service du NOFFi, basé sur les données de Sentinel-2, est un nouvel outil inestimable pour la gestion post-incendie ». D'autres services semblables ont également été développés en Espagne (voir « Storytelling tool for a forest fire in Yeste » (« Outil de suivi d'un feu de forêt à Yeste »)) et en Croatie (voir « Wildfire management on the Croatian territory » (« Gestion des feux de végétation sur le territoire Croate »)).

**Dans cette section, nous avons montré que la qualité des prévisions météorologiques fournies par Météo-France a été déterminante pour permettre à la sécurité civile d'anticiper et de mieux contrôler les incendies de forêts, qui ont des conséquences majeures sur l'environnement. Quant aux missions Sentinel d'observation de la Terre du programme Copernicus, elles ont déjà donné des résultats prometteurs en Europe, principalement dans les pays méditerranéens très touchés par les incendies de forêt, pour la détection rapide et la cartographie des incendies, mais également pour l'évaluation des dommages et pour le choix des mesures optimales de restauration écologique. L'utilité des données Sentinel pour mettre au point ces services étant largement reconnue par les différents utilisateurs européens, il est vraisemblable que d'autres services similaires verront le jour dans les années à venir.**

### C. Gestion des espaces forestiers, agricoles et montagnards et de leurs écosystèmes

#### *i. Rôle de l'observation de la Terre pour le suivi des changements d'utilisation et d'occupation des sols*

L'Europe est l'une des régions du monde où les terres sont le plus intensément exploitées, notamment pour l'habitation, les systèmes de production et les infrastructures (jusqu'à 80 % des terres en Europe selon l'AEE<sup>36</sup>). **Le sol étant une ressource finie, son utilisation représente l'un des principaux facteurs de changement environnemental, avec des impacts importants sur les écosystèmes.** Par conséquent, il est essentiel de mieux gérer l'utilisation des sols et ses conséquences.

<sup>33</sup> Fabio Modesti, Alta Murgia National Park (source : « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018)).

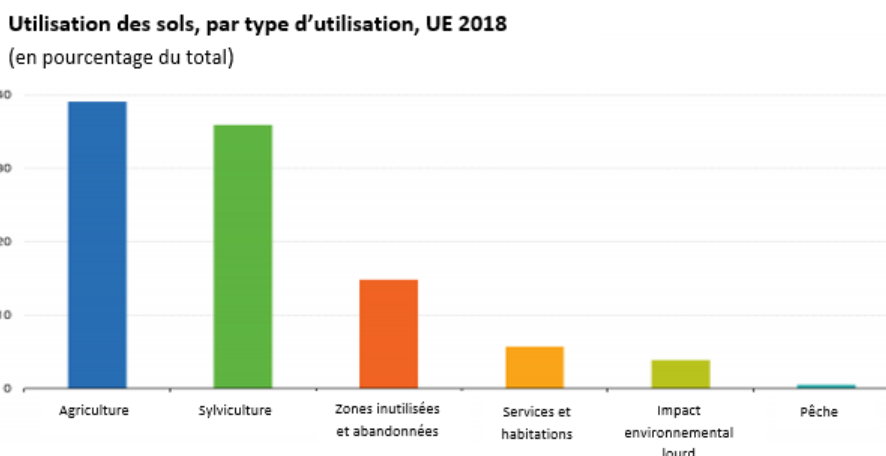
<sup>34</sup> Source : « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). CE.

<sup>35</sup> Antonios Kapetanios est le directeur général des forêts et de l'environnement forestier en Grèce. Il a participé à l'étude « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions (2018) ».

<sup>36</sup> Voir <https://www.eea.europa.eu/fr/themes/landuse/intro>.



Figure 13 : Principales utilisations des sols en Europe, par type d'utilisation (2018)



Source : Eurostat

D'après l'enquête LUCAS (enquête de l'Union européenne sur l'utilisation et l'occupation des sols)<sup>37</sup> menée entre mars et novembre 2018 en Europe, Eurostat a défini des types d'utilisation des sols en Europe et leur importance relative de la superficie. On observe que la plus grande partie du territoire européen était dédiée à l'agriculture (39,1 % du total, répartis entre cultures, prairies, etc.) et à la sylviculture (35,9 %)<sup>38</sup>. Environ 15 % de la superficie totale étaient inutilisés ou abandonnés et 5,7 % étaient affectés aux services ou à l'habitat (commerce, finance et entreprises, services publics, loisirs et sports, zones résidentielles, réserves naturelles), tandis que 3,9 % étaient affectés à des activités ayant des impacts environnementaux directs<sup>39</sup> (mines et carrières, production d'énergie, industrie, traitement des eaux et des déchets, construction). Enfin, une faible partie du territoire (0,5 %) est utilisée pour la pêche.

Bien que les deux concepts d'utilisation et d'occupation des sols soient souvent utilisés sans distinction, ils ont des sens différents : l'utilisation des sols désigne leur utilisation socioéconomique (par exemple, agriculture, sylviculture, habitat, comme indiqué précédemment), alors que l'occupation des sols désigne leur couverture biophysique (par exemple, cultures, prairies, forêts de feuillus ou zones bâties). L'occupation des sols est un bon indicateur de l'utilisation des sols, mais il peut être nécessaire de pousser plus loin pour comprendre vraiment quelle est l'utilisation d'une zone (par exemple, les zones définies comme bâties sont-elles dédiées à l'habitat ou à l'industrie ?).

**Les activités humaines ont conduit à une utilisation excessive des sols, qui exerce des pressions importantes sur les écosystèmes, la biodiversité et les habitats naturels.** Entre 2013 et 2018, seuls 14,7 % des habitats étaient jugés en bon état de conservation dans l'Union européenne ; 35,8 % étaient en mauvais état et 44,9 % en très mauvais état de conservation<sup>40</sup>. **Les activités agricoles, lorsqu'elles sont intensives, peuvent être une source majeure de pression sur les habitats** en raison de l'extension des zones cultivées (notamment lors de la conversion en terres cultivées de prairies qui constituent un habitat semi-naturel pour des animaux d'élevage, des plantes et des animaux sauvages), du surpâturage, etc. **La sylviculture est également un secteur dont les activités peuvent exercer une pression importante sur l'écosystème** : déforestation pour la production de bois, le pâturage ou la construction, élagage pour le bois de chauffage ou le fourrage (qui affecte la croissance des arbres), tourisme, etc.

La prise de conscience croissante, dans les États membres, de la fragilisation des écosystèmes et du déclin de la biodiversité, a conduit l'UE à adopter des mesures législatives dont les plus connues sont la **directive**

<sup>37</sup> L'enquête LUCAS est la plus grande enquête harmonisée menée en Europe à partir de visites sur le terrain.

<sup>38</sup> Source : [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Land\\_use\\_statistics#Land\\_use](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Land_use_statistics#Land_use).

<sup>39</sup> Qualifiées d'activités à « impact environnemental lourd » sur le schéma, mais leur impact réel dépend de leur mise en œuvre.

<sup>40</sup> Source : <https://www.eea.europa.eu/ims/conservation-status-of-habitats-under>.

**concernant la conservation des oiseaux sauvages**<sup>41</sup>, qui a pour objectif de protéger l'ensemble des 500 espèces d'oiseaux sauvages menacées par les activités humaines (agriculture intensive, sylviculture, transports, pêche, chasse, etc.) et la **directive concernant la conservation des habitats naturels**<sup>42</sup> qui a pour objectif d'assurer la conservation d'un large éventail d'espèces animales et végétales rares, menacées ou endémiques, ainsi que 200 types d'habitats rares. Cette dernière vise à promouvoir le maintien de la biodiversité et constitue le réseau écologique européen, dénommé « **Natura 2000** »<sup>43</sup>, de zones spéciales de conservation protégées contre les développements potentiellement dommageables. Notamment, l'article 17 de la directive concernant la conservation des habitats naturels demande aux États membres de transmettre à la Commission européenne, tous les six ans, un rapport d'évaluation sur l'état de conservation des habitats et des espèces visés par la directive.

Associées aux enquêtes in-situ, **les observations spatiales ont prouvé leur utilité pour cartographier et suivre les changements d'occupation des sols, afin de mieux détecter et contrôler les pressions exercées sur les écosystèmes fragiles et de prendre des mesures appropriées pour se conformer aux directives européennes.** En ce qui concerne l'utilisation des sols forestiers, les inventaires forestiers se sont révélés des outils précieux de suivi, **qui se sont améliorés avec l'émergence des observations spatiales en complément des inspections sur le terrain.**

Le suivi de l'occupation des sols depuis l'espace était déjà bien développé avant la mise en œuvre opérationnelle du programme Copernicus en 2014, grâce au satellite américain Landsat-8 et d'autres tels que Deimos-1, et aux satellites du programme GMES, prédécesseur de Copernicus. L'Agence européenne pour l'environnement avait créé, en 1985, dans le cadre du programme européen GMES, la base de données Corine Land Cover, inventaire biophysique de l'occupation des sols de 39 pays européens. Toutefois, ces six dernières années ont montré le potentiel important de Sentinel-2 pour la cartographie et l'analyse de l'occupation des sols. Les principaux facteurs du succès des données de Sentinel-2 sont l'accès gratuit, la haute résolution spatiale (10 à 20 m), la fréquence élevée de revisite et la présence d'un capteur<sup>44</sup> capable de détecter avec précision l'indice de réflectance (utilisé pour obtenir des informations essentielles sur l'état de la végétation et calculer des indices de végétation). En d'autres termes, Sentinel-2 a permis d'avoir une vue plus précise (plus grande résolution) et plus complète de l'occupation des sols que Landsat et les autres programmes précédents, et d'obtenir des cartes plus détaillées de l'utilisation et de l'occupation des sols, à une échelle plus fine. Kussul, *et al.* (2017) ont comparé la classification de l'occupation des sols obtenue avec Landsat 8-OLI, qui ne dispose pas de bande dans la partie du spectre dite « red-edge » (région comprise entre le rouge visible et le proche infra-rouge), et celle obtenue avec les images de Sentinel-2. Les résultats montrent que les bandes dans le « red-edge » ont amélioré la précision de la classification de 4 à 5 % (Phiri *et al.*, 2020).

---

<sup>41</sup> Directive 79/409/CEE adoptée en 1979 et modifiée en 2009 en directive 2009/147/CE : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0147>.

<sup>42</sup> Directive 92/43/CEE adoptée en 1992 : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A31992L0043>.

<sup>43</sup> Natura 2000 est le plus grand réseau cohérent de zones protégées au monde, constitué en 2010. Il abrite la plupart des espèces et habitats importants ou menacés.

<sup>44</sup> Plus précisément, des bandes spectrales dans le proche infra-rouge.

Figure 14 : Occupation des sols d'après les données de Sentinel-2



Source : Agence spatiale européenne

Le satellite Sentinel-2 du programme Copernicus transmet des images idéales pour la cartographie de l'occupation des sols, mais la production de cartes exige de traiter des quantités énormes de séries temporelles. Afin de rendre ce traitement possible, le projet *Sentinel-2 for Science Land Cover*, financé par l'ESA<sup>45</sup>, vise à trouver de nouvelles manières d'utiliser les dernières technologies d'informatique en nuage et d'apprentissage automatique pour produire des cartes automatiquement. Bien que le projet n'en soit encore qu'au stade expérimental, les résultats montrent que la cartographie entièrement automatisée est pour très bientôt. Par exemple, l'occupation des sols en Europe a été représentée à l'aide de 13 types différents d'occupation (voir figure 14 ci-contre).

**Cette image montre que Copernicus est capable de fournir les données nécessaires pour dessiner une carte de l'occupation des sols à une échelle très fine, en prenant en compte des types d'occupation détaillés.** La précision de cette carte est également très prometteuse. Par exemple Helber *et al.* (2019) ont relevé une précision globale de 98,57 % de la classification des types d'occupation pour les cartes utilisant des images transmises par les satellites Sentinel-2 (comparées à des photographies aériennes montrant l'occupation réelle). **Les satellites Sentinel-1 peuvent aussi être utilisés pour aider à la classification des types**

**d'occupation des sols**, par exemple en détectant les coupes claires et partielles dans les forêts et en permettant de reconnaître les différents types de peuplements forestiers et de cultures.

Dans le secteur forestier, les données de Sentinel-2 sont un outil très puissant pour la cartographie des zones forestières, la délimitation de types spécifiques de peuplements forestiers, la distinction entre les différents types, etc. (Phiri *et al.*, 2020). **Le développement d'une approche de la gestion forestière solidement fondée sur une évaluation fiable des ressources actuelles et sur la détection et le suivi des modifications les plus significatives de l'utilisation des forêts et des sols a contribué à atténuer les principaux impacts écologiques négatifs** (par exemple, la perte ou la dégradation des zones de végétation et des habitats indigènes)<sup>46</sup> et donc de mieux préserver les zones naturelles vulnérables.

**Le secteur agricole a aussi bénéficié du développement des services de cartographie utilisant les données de Copernicus.** En Espagne, par exemple, Sentinel-1 et Sentinel-2 fournissent des outils précieux pour l'établissement de cartes annuelles de l'occupation des sols et du détail des cultures et des zones naturelles en Castille et León. **Ces cartes ont permis à l'État de contrôler les zones protégées visées par la directive concernant la conservation des habitats<sup>47</sup>.** Conjointement avec les inspections sur le terrain, Sentinel-1 et

<sup>45</sup> [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2020/03/Europe\\_land-cover\\_mapped\\_in\\_10\\_m\\_resolution](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Europe_land-cover_mapped_in_10_m_resolution).

<sup>46</sup> La forêt régionale des Açores (Portugal) en est un bon exemple. Les données combinées de Landsat-8, Sentinel-1 et Sentinel-2 ont été utilisées en complément des études de terrain pour améliorer la précision de la classification dans les inventaires forestiers → voir « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). CE. p. 53.

<sup>47</sup> « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). CE. p. 33.

**Sentinel-2 ont également permis de surveiller la dégradation des prairies.** Lorsqu'elles sont dégradées, les prairies remplissent moins bien leur rôle dans l'écosystème, ce qui entraîne une perte de biodiversité. La **connaissance de l'utilisation des sols** est donc essentielle pour permettre aux autorités locales de mettre en œuvre les mesures les plus adaptées pour une gestion optimale de ces zones (par exemple, le suivi des prairies ayant la plus grande diversité d'espèces, qui pourront être fauchées ou pâturées mais non labourées, afin de préserver la biodiversité).

De plus, **Sentinel-2 s'est révélé utile pour la surveillance des prairies naturelles de montagne.** Par exemple, dans le parc national italien de Gran Paradiso<sup>48</sup>, **la productivité des plantes, la couverture neigeuse, la température de surface, ainsi que les changements d'occupation des sols ont été étudiés grâce aux données de MODIS, Landsat et Sentinel-2.** Ces observations ont aidé les autorités compétentes à surveiller la biodiversité et les conditions de survie des herbivores du parc et leur ont permis de prendre des décisions mieux fondées et, par conséquent, d'améliorer la conservation du paysage naturel, des habitats et des populations animales.

Enfin, la directive concernant la conservation des habitats exige, dans le cadre du réseau Natura 2000, l'évaluation d'habitats situés dans des zones reculées comme la zone alpine. Le relevé sur le terrain des types d'habitats de ces zones peut coûter cher et prendre beaucoup de temps car elles sont difficiles d'accès en raison de leurs caractéristiques environnementales. Les régions montagneuses en sont une bonne illustration car elles sont étendues, ont une topographie accidentée, des conditions météorologiques très changeantes et des périodes sans enneigement très courtes. **Les images à haute résolution transmises par Sentinel-2 ont fait progresser la cartographie des habitats de ces régions.** Par exemple, l'État autrichien a lancé un projet d'aide à l'évaluation des habitats alpins – à l'aide des données de Sentinel-2 qui permettent de détecter les changements d'occupation des sols dans les zones sensibles (végétation, rochers, glaciers, neiges, etc.) – afin d'organiser les relevés sur le terrain en zones difficiles. **Ce projet a joué un rôle précieux dans l'évaluation du déclin de la biodiversité (en permettant de détecter les dégradations de la qualité des écosystèmes) et dans la mise en place, par les autorités, de mesures spécifiques de protection de la nature pour ralentir ce déclin ou y mettre un terme**<sup>49</sup>.

**Les premières années de Copernicus ont révélé le potentiel prometteur du programme comme complément des études de terrain pour la cartographie de l'occupation des sols. Nous avons vu que la cartographie de l'occupation des sols et des habitats fondée sur les observations récentes de la Terre par la mission Sentinel est une solution fiable et économiquement viable. Elle est à la fois moins sujette aux perceptions humaines et moins chronophage que les traditionnels relevés sur le terrain, et plus précise que celles qui se basent sur d'autres programmes d'observation de la Terre. De plus, la haute résolution spatiale et la fréquence élevée de revisite de Sentinel-2 facilitent la surveillance continue de l'évolution des habitats, conformément aux exigences de la directive européenne concernant les habitats qui prévoit une mise à jour tous les six ans.**

## *ii. Rôle de l'observation de la Terre dans la surveillance sanitaire des arbres*

La lutte contre les maladies des arbres fait partie des principales activités de la sylviculture, car les forêts souffrent de multiples agents pathogènes, carences nutritives et attaques de ravageurs. Pour un arbre, on entend par maladie tout écart par rapport à son fonctionnement normal ou mauvais fonctionnement attribuable à la persistance d'un agent pathogène. Il existe environ une centaine de maladies pour chaque espèce végétale, déclenchées par différents facteurs. Parmi les pathogènes qui provoquent des maladies chez les arbres se trouvent des champignons, des bactéries, des virus, des plantes parasites, des nématodes et d'autres microorganismes. L'identification d'une maladie dépend donc de la cause, de l'hôte, de la partie affectée de l'arbre et de son âge. Les symptômes les plus fréquents associés aux maladies sont la décoloration

<sup>48</sup> Le projet ECOPotential, développé par les gestionnaires et l'équipe scientifique du parc en collaboration avec 24 autres zones protégées en Europe → source : « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). CE. p. 69.

<sup>49</sup> Pour plus d'informations sur ce projet, voir « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). CE. p. 63.

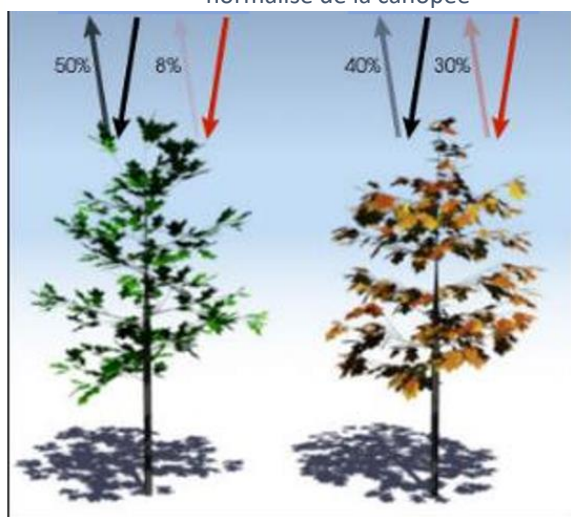
des feuilles et la défoliation précoces, mais des défauts de l'écorce, des zones de pourriture, la présence de branches mortes ou une croissance irrégulière peuvent également être le signe que l'arbre souffre d'un stress causé par une maladie.

Couvrant 178 millions d'hectares qui représentent 40 % de la superficie totale de l'UE, les forêts européennes sont essentielles à la biodiversité du point de vue des ressources et des habitats. Ces forêts sont souvent exposées à des stress importants tels que les incendies, mais également aux maladies. Par exemple, l'Europe du Sud a été frappée par une bactérie mortelle, *Xylella fastidiosa*, qui s'attaque aux oliviers depuis 2013. En sept ans, la maladie a détruit des millions d'oliviers en Italie et menace maintenant l'Espagne et la Grèce<sup>50</sup>, tandis que les scientifiques sont toujours à la recherche d'un traitement. Il est donc indispensable de mieux se préparer à lutter contre les maladies des arbres, surtout dans le cadre d'un changement climatique qui conduira à l'augmentation de leur fréquence et de leur intensité<sup>51</sup>.

L'un des objectifs clés de la lutte contre les maladies est de reconnaître et de retirer des sites les arbres atteints, afin d'éviter la propagation de la maladie aux arbres sains. Les observateurs de terrain peuvent repérer les arbres qui présentent des symptômes tels que la décoloration des feuilles et la défoliation précoces. **Toutefois, les premiers symptômes apparaissent généralement sur les branches hautes et sont difficiles à détecter depuis le sol** (Iordache *et al.*, 2020). De plus, bien que la présence d'une bactérie puisse être confirmée par des analyses de laboratoire après avoir recueilli des échantillons de bois sur des arbres, il est impossible de récolter des échantillons sur tous les arbres de zones relativement étendues. Par conséquent, **la télédétection a naturellement été considérée comme un outil complémentaire efficace pour assurer cette importante activité de gestion forestière. La détection précoce des maladies des arbres par imagerie spatiale peut augmenter les chances de succès de la lutte contre les maladies, notamment si elle est associée à des repérages par drones et des inspections sur le terrain.**

**En particulier, l'arrivée des images à haute résolution spatiale et temporelle transmises par Sentinel-2 tous les cinq jours a permis d'améliorer notablement la détection des maladies des arbres et la lutte contre ces dernières.** À partir des données collectées par Sentinel-2, il est possible de représenter une forêt d'après des

Figure 15 : Indice de végétation par différence normalisé de la canopée



$$\frac{(0,50 - 0,08)}{(0,50 + 0,08)} = 0,72 \quad \frac{(0,4 - 0,30)}{(0,4 + 0,30)} = 0,14$$

Source : NASA

indices comme l'indice de végétation par différence normalisé (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI), puis de distinguer entre les arbres malades ou les arbres sains selon l'état de leur canopée<sup>52</sup>. Le NDVI est un indice sans dimension qui mesure la végétation par la différence des émissions entre le proche infrarouge (que la végétation reflète fortement) et la lumière rouge (que la végétation absorbe)<sup>53</sup>. Cet indice est donc largement utilisé pour évaluer la densité du vert dans une zone et pour savoir si elle contient une végétation verte, vivante. Plus précisément, cet indice montre si la canopée est verte ou (cette couleur étant signe de stress) afin de détecter une maladie au stade précoce. Comme le montre l'illustration ci-contre, plus la valeur du NDVI est élevée, plus la végétation est saine. À l'inverse, une valeur faible du NDVI signifie qu'il y a peu ou pas de végétation verte, ce qui peut être le signe d'une maladie. **Ces informations à l'échelle de l'arbre sont déterminantes**

<sup>50</sup> Source : <https://www.npr.org/2020/05/03/849551027/southern-europe-could-lose-22-billion-fighting-deadly-olive-tree-disease>.

<sup>51</sup> En effet, les hivers plus chauds permettent aux agents pathogènes de mieux survivre, ce qui favorise l'apparition et la gravité des maladies.

<sup>52</sup> Le terme « canopée » est utilisé pour désigner l'ensemble de la couche extérieure des feuilles d'un arbre ou d'un groupe d'arbres.

<sup>53</sup> Les végétaux en bonne santé (chlorophylle) reflètent plus le proche infrarouge et le vert que les autres longueurs d'onde, mais ils absorbent plus de lumière bleue et rouge, ce qui explique pourquoi nous les voyons en vert. Les capteurs des satellites comme Landsat et Sentinel-2 disposent tous deux des bandes spectrales nécessaires en proche infrarouge et rouge.

**car elles peuvent être utilisées pour guider les forestiers dans leurs inspections sur le terrain en cas de suspicion sur une zone. Les premières recherches ont donné des résultats prometteurs en ce qui concerne la contribution de Copernicus à la détection précoce des maladies des arbres.** Par exemple, Hornero *et al.* (2018) ont montré que les images transmises par Sentinel-2 pouvaient fournir des indications spatio-temporelles précieuses pour suivre et cartographier les altérations de la canopée provoquées par l'infection par *Xylella fastidiosa* dans les oliveraies sur des superficies étendues. Haghghian *et al.* (2020) ont étudié les résultats obtenus avec des images de Sentinel-2 pour la détection des chênes infestés par l'un des principaux ravageurs des forêts d'Iran, *Tortrix viridana*. Plusieurs indices ont été calculés à partir des images de Sentinel-2, notamment le NDVI, mais aussi le SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*, indice de végétation ajusté au sol), l'IPVI (*Infrared Percentage Vegetation Index*, indice de végétation en pourcentage infrarouge) et l'IRECI (*Inverted Red-Edge Chlorophyll Index*, indice de chlorophylle inversé sur le « red-edge »). **Les résultats ont montré que ces indices de végétation présentaient des différences significatives entre les zones affectées et non affectées de l'étude, avec un degré de fiabilité de 99 % (avec des coefficients de corrélation de Spearman faibles pour tous les indices entre zones affectées et non affectées), ce qui prouve que les images de Sentinel-2 peuvent servir à détecter les ravageurs dans les zones forestières.** Le service Silvisense, qui utilise les données de Sentinel-2 et des algorithmes pour cartographier les perturbations en zones forestières, est en cours d'expérimentation au Portugal. Selon un rapport de la Commission européenne, les utilisateurs de ce service seraient à même de détecter l'apparition d'un problème à un stade précoce et de couper les arbres atteints, réduisant ainsi de 60 % l'apparition de la maladie à la saison suivante<sup>54</sup>.

**Il est particulièrement important de détecter efficacement et précocement les maladies des arbres afin de mieux lutter contre elles et de prévenir des dommages irréversibles sur l'environnement. En effet, le fait d'empêcher une maladie de se propager permet de réduire le nombre d'arbres atteints, ce qui est essentiel pour capturer les émissions de dioxyde de carbone et donc atténuer le changement climatique. La détection précoce des perturbations peut également diminuer les dommages écologiques, ce qui a pour conséquence une amélioration de la qualité de l'eau, des sols et de l'air<sup>55</sup>, ainsi que la préservation des habitats.**

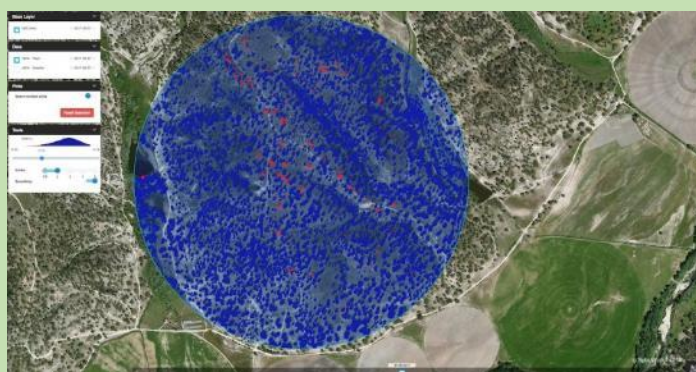
---

<sup>54</sup> Source : « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). CE. p. 47.

<sup>55</sup> Les arbres et la végétation peuvent aider à lutter contre les problèmes de qualité de l'eau en diminuant le ruissellement des eaux pluviales et l'érosion des sols. Les arbres absorbent aussi une partie des nutriments du sol, qui seraient lessivés en leur absence. Enfin, ils peuvent améliorer la qualité de l'air en réduisant les températures (ce qui aboutit à une réduction de l'ozone) et en éliminant les polluants atmosphériques.

## Études de cas

Figure 16 : Détection des maladies des arbres (Portugal)



Source : ESA

### Application Mapp.it<sup>56</sup> (Portugal)

Spin.Works (société portugaise de développement et de déploiement de systèmes spatiaux autonomes et intelligents) a lancé en 2017 une application de cartographie qui utilise des données issues de drones et des satellites Sentinel-2 pour établir des cartes permettant de différencier les arbres malades des arbres sains. L'illustration ci-contre montre un exemple de détection des maladies des chênes-lièges dans la région de l'Alentejo (partie centrale du Sud du Portugal), les arbres sains apparaissant en bleu et les malades en rouge. Au vu de cette carte, les forestiers peuvent inspecter sur le terrain les zones atteintes

et procéder à des analyses de laboratoire sur des échantillons de bois afin d'identifier la maladie et s'y attaquer de manière adéquate et optimale (par des mesures appropriées telles que la multiplication des arbres résistants, le contrôle des populations d'insectes, l'utilisation de méthodes chimiques ou biologiques, etc.).

### Portail SIG interactif de Rezatec pour le ministère britannique de l'environnement, de l'alimentation et des affaires rurales (Defra, *Department for Environment, Food & Rural Affairs*)<sup>57</sup>

Pour l'aider à gérer l'apparition de la maladie du chancre du châtaignier, le Defra a demandé au service Rezatec de télécommunications par satellite de créer une carte interactive utilisant les données des satellites Sentinel-1 et Sentinel-2 et permettant :

- de repérer les implantations de châtaigniers et de chênes grâce à la signature spectrale spécifique de ces espèces dans les bases de données d'observation de la Terre ;
- de détecter les anomalies et les changements dans la végétation : des séries temporelles annuelles ont été analysées pour chaque pixel dans les zones étudiées, afin de repérer les modifications majeures (temporelles et spatiales) du comportement phénologique, considéré comme un indicateur du stress de la canopée. Les zones où un stress a été repéré ont été signalées aux équipes de terrain pour qu'elles les inspectent en priorité afin de rechercher la présence de ravageurs et de maladies.

Il semble que ce service ait apporté toute satisfaction, comme l'a confirmé Willem Roelofs (de l'équipe Santé végétale du Defra) qui déclarait : « *Leur capacité à cartographier l'implantation de différentes espèces d'arbres à un niveau remarquablement élevé de précision nous a aidé à intervenir lors de l'apparition de la maladie et pourrait révolutionner la manière dont le Defra agit pour circonscrire les foyers de ravageurs et de maladies dans l'environnement au sens large* ».

Comme nous l'avons indiqué plus haut, **cette section confirme l'utilité croissante des données du programme Copernicus pour aider les forestiers à surveiller les forêts et les dangers qui les menacent (activités humaines, incendies, maladies...) et à prendre à un stade précoce des mesures optimales de restauration et de conservation. Il s'agit là d'actions vitales, car les forêts sont des puits de carbone essentiels, abritent une grande part de la biodiversité et garantissent la bonne qualité des sols, de l'eau et de l'air.**

<sup>56</sup> Source : ESA – Success Stories → <https://sentinels.copernicus.eu/web/success-stories/-/disease-detection>.

<sup>57</sup> Source : "The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions" (2018). CE. p. 54.

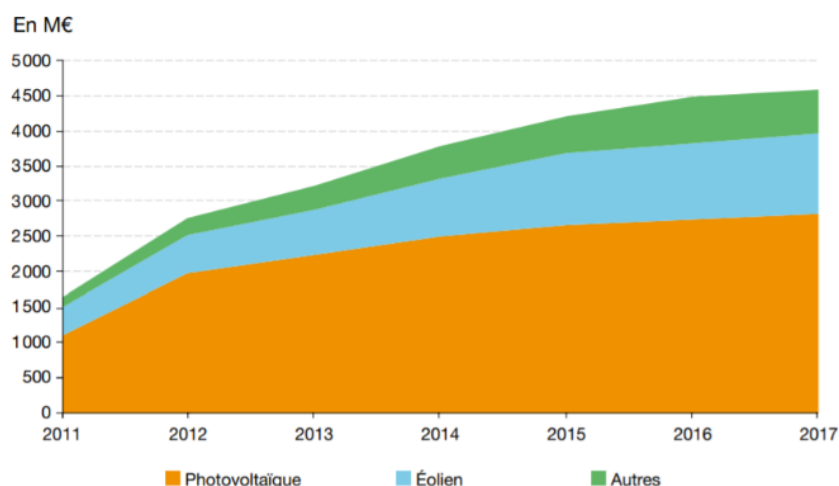
## 2. Production d'énergie

### A. Développement des énergies solaire et éolienne

La part des sources renouvelables dans la production d'électricité ne cesse de croître en France depuis 2010. Cela concerne en particulier les énergies les plus sensibles aux variations météorologiques de court terme, telles que l'éolien sur terre et en mer, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique. La capacité de production des parcs éoliens installés a pratiquement triplé entre 2010 et 2019 (de 5 762 à 16 511 MW), tandis que la capacité des fermes solaires a été multipliée par plus de 10 pendant la même période (de 878 à 9 567 MW)<sup>58</sup>.

Les coûts d'exploitation des fermes solaires et des parcs éoliens étaient particulièrement élevés lorsque ces sources d'énergie sont apparues. Toutefois, en subventionnant massivement ce secteur tout au long de la dernière décennie<sup>59</sup>, l'État français a contribué à ce que les énergies renouvelables, dont l'éolien et le solaire, soient compétitives sur le marché. Le pari était que les coûts diminueraient du fait du progrès technologique, de la structuration des secteurs industriels et des effets d'échelle.

Figure 17 : Évolution des subventions publiques accordées aux énergies renouvelables en France (en millions d'euros)



Source : CRE, calculs du SDES (ministère de la transition écologique)

Ce graphique montre que la plus grande part des subventions a été utilisée pour soutenir les producteurs d'énergie solaire, avec plus de 2,5 milliards d'euros en 2017 (2,5 fois plus qu'en 2011), alors que près de 1,2 milliard d'euros (25 % du total des subventions) était consacré aux producteurs d'énergie éolienne. Ces subventions ont été attribuées aux producteurs dans le cadre des mécanismes des obligations d'achat et des compléments de rémunérations.

Outre les subventions publiques, qui ont facilité l'émergence des énergies éolienne et solaire en France, **disposer de prévisions météorologiques précises s'est également révélé essentiel pour permettre l'intégration de ces énergies, particulièrement dépendantes des conditions météorologiques**, dans le réseau électrique. Par ailleurs, de nouveaux outils basés sur l'observation de la Terre ont été développés pour aider les producteurs à prendre des décisions optimales, notamment concernant le choix des sites sur lesquels construire les parcs éoliens ou les fermes solaires.

<sup>58</sup> Source : RTE – Bilan électrique 2020.

<sup>59</sup> Voir <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-05/datalab-53-chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2019-mai2019.pdf>.



i. *Prédictibilité de la production des énergies renouvelables grâce aux prévisions météorologiques*

Avant tout, il convient de bien comprendre le fonctionnement du marché de l'électricité en France. Pour promouvoir la transition énergétique, l'État français s'était engagé à garantir l'achat de 100 % de la production d'énergies renouvelables<sup>60</sup>. Le dispositif des tarifs d'achat garantis (*feed-in tariffs*) a été mis en place afin d'assurer un retour sur investissement normal à la production d'électricité à partir de sources renouvelables, le niveau de prix auquel le fournisseur d'énergie achetait l'électricité étant fixé par arrêté à un niveau supérieur au prix du marché (correspondant au seuil de rentabilité pour le producteur).

Toutefois, conformément au double objectif européen de transition énergétique et de principe de compétitivité, les énergies renouvelables entrent progressivement sur le marché, et le besoin des producteurs de bénéficier d'un prix fixe diminue progressivement à mesure que les projets gagnent en rentabilité (hormis le cas de l'éolien en mer qui reste encore globalement très coûteux). Comme ils n'ont plus autant besoin d'être soutenus par le dispositif des tarifs d'achat garantis, les producteurs doivent désormais vendre leur production sur le marché de l'électricité et revoir leurs méthodes de production afin de pouvoir s'adapter aux fluctuations du marché. Leurs revenus proviennent désormais de leurs ventes à un prix variable sur le marché et du complément de rémunération introduit dans la législation française en 2015<sup>61</sup>, dans le cadre de la refonte des mécanismes de soutien aux énergies renouvelables. La bourse de l'électricité EPEX SPOT joue un rôle central dans ce nouveau dispositif<sup>62</sup>. La première composante de la rémunération permise par le mécanisme de vente directe consiste, pour le propriétaire d'un parc éolien ou d'une ferme solaire, à vendre sa production à un prix négocié sur les marchés de gros, soit par ses propres moyens s'il dispose d'une salle de marché, soit par l'intermédiaire d'une société tierce (agrégateur).

**Dans un contexte où les producteurs doivent déclarer en amont les quantités d'électricité qu'ils vendront et mettront à disposition sur le réseau, les prévisions météorologiques à très court terme sont devenues essentielles pour les producteurs d'énergies renouvelables.** Par exemple, en l'absence de vent, les éoliennes produisent peu d'électricité. Si les exploitants de parcs éoliens se sont engagés à vendre un certain volume d'électricité le lendemain et ne sont pas en mesure de respecter leur engagement, ils s'exposent à des pénalités. Cela montre l'impact financier de l'exactitude des prévisions météorologiques pour les producteurs d'énergies renouvelables. Plus la prévision numérique du temps est précise, fiable et localisée, meilleure est la gestion opérationnelle de l'ensemble du secteur, ce qui réduit le risque financier et incite à choisir ce type d'investissement durable.

Des prévisions fines de l'état de l'atmosphère (vent, rayonnement), à la fois à très court et court termes, sont donc essentielles pour le pilotage de la production et des marchés. Par exemple, Pinson *et al.* (2007) ont étudié un parc éolien de 15 MW en Irlande et ont comparé les erreurs de prévision de la production d'énergie qui résultent de la méthode des réseaux neuro-flous (RNF), dont la performance se situe au niveau des techniques les plus avancées, avec celles qui résultent du modèle le plus simple, la prévision par persistance, consistant à utiliser la dernière valeur mesurée comme valeur de prévision pour tous les horizons. Ils ont constaté que la méthode de la persistance produisait une baisse de 21 % du revenu total (contre 13 % pour celle des réseaux neuro-flous) par rapport à une situation idéale avec des prévisions parfaites.

Cela démontre l'importance de prévisions météorologiques précises pour la rentabilité de la production. Dans le scénario contrefactuel sans Météo-France, les producteurs auraient accès aux prévisions du modèle américain GFS qui, depuis 2017, fournit des prévisions avec une résolution horizontale de 28 km pour

<sup>60</sup> Loi n° 2000-108 du 10 février 2000, article 10.

<sup>61</sup> Ce mécanisme a été introduit par l'article 104 de la loi relative à la transition énergétique adoptée en juillet 2015.

<sup>62</sup> Voir <https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/eolien-fee-innovation/elies-lahmar-arnault-martin-epex-spot-integration-eolien-merche-gros-electricite.php>.

différentes variables, telles que le vent ou la nébulosité (couverture nuageuse), heure par heure ou par tranches de trois heures.

La production d'énergie éolienne dépend de la vitesse du vent (celle-ci devant être comprise entre 15 et 90 km/h au niveau du moyeu de l'éolienne) et de sa direction. Ces variables peuvent varier considérablement d'un jour à l'autre, même à l'intérieur de zones peu étendues, notamment lorsque le relief est inégal ou à proximité d'un littoral. Il est encore plus difficile d'établir des prévisions dans le domaine de la production d'énergie solaire, du fait que la couverture nuageuse est plus imprévisible que ne le sont les moyennes de température, la vitesse du vent ou la pluviosité. La formation d'un nuage implique un très grand nombre de processus physiques et chimiques complexes, et les prévisions dépendent de phénomènes se produisant à l'échelle planétaire et dans l'ensemble de l'atmosphère. **La résolution offerte par le modèle GFS entraînerait donc probablement des erreurs beaucoup plus importantes dans les prévisions de production d'électricité, donc davantage de pénalités pour les producteurs. Même s'il ne s'agit pas du principal facteur de décision pour les investisseurs, on peut penser qu'ils auraient été moins enclins à investir dans ce secteur s'il avait été difficile de prévoir la vitesse du vent, notamment dans le nouveau contexte des prix variables sur le marché des énergies renouvelables.**

L'impact financier des prévisions météorologiques sur la production d'énergies renouvelables est important du point de vue environnemental car les investissements dans ce domaine ont été et seront déterminants pour mettre en œuvre la transition énergétique et réduire la part des énergies fossiles dans le réseau électrique. Dans une étude<sup>63</sup>, RTE a évalué les émissions évitées grâce à la production éolienne et solaire, en simulant ce que serait le fonctionnement du système électrique actuel sans ces installations. **Cette étude a chiffré les émissions évitées à environ 22 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an (5 millions de tonnes en France et 17 millions de tonnes dans les pays voisins grâce à l'énergie française importée).** En d'autres termes, si ces capacités de production n'avaient pas été développées, le thermique fossile aurait été davantage sollicité en France et en Europe, ce qui aurait entraîné des émissions supplémentaires, notamment par les centrales au charbon ou au gaz. Rien ne permet de déterminer avec certitude la part de ces émissions évitées attribuable aux prévisions météorologiques. Cependant, **nous avons vu dans cette section que la précision des prévisions météorologiques est essentielle pour les revenus financiers des producteurs d'énergies éolienne et solaire, et pour le développement de ces secteurs. Nous pouvons donc affirmer que Météo-France, le CEPMMT et EUMETSAT ont joué un rôle crucial dans le développement de la production éolienne et solaire sur le marché, et participé ainsi à éviter l'émission d'importantes quantités de CO<sub>2</sub>.**

*ii. Optimisation du choix des sites de production à partir de projections climatiques et d'outils d'observation spatiale*

Cros et Pinson (2018) expliquent que le promoteur d'un projet de parc éolien ou de ferme solaire doit, avant toute construction, connaître le potentiel d'un territoire afin de pouvoir optimiser le choix du terrain ainsi que la capacité et la rentabilité de l'installation. Des données de séries chronologiques sur les 10 à 30 dernières années peuvent être utilisées pour obtenir une année statistique représentative du territoire (appelée « année météorologique type ») qui permet d'estimer la production potentielle à long terme (environ 20 ans). Ces séries incluent des moyennes et des quantiles, heure par heure, de données solaires et éoliennes, à partir desquels il sera possible d'évaluer le niveau de production le plus probable et de quantifier les risques en matière de rentabilité. **Une telle projection climatique, basée sur des données historiques et visant une zone très localisée, est proposée par les services de Météo-France.** Il est probable que les services américains fournissent des données semblables, mais pas à l'échelle d'une installation de production. **Ce type de service encourage les nouveaux projets d'énergies renouvelables (en limitant les risques pour les investisseurs**

<sup>63</sup> Note : Précisions sur les bilans CO<sub>2</sub> établis dans le bilan prévisionnel et les études associées (RTE).

potentiels) et augmente leurs chances de succès et d'intégration au réseau électrique sur le long terme, au détriment d'autres sources, notamment davantage émettrices de GES.

Ce service peut être complété par des outils utilisant les données d'observation de la Terre fournies par le programme Copernicus. Par exemple, les données satellitaires – en particulier météorologiques (nuages, vapeur d'eau) et atmosphériques (aérosols, ozone) – sont des données clés utilisées pour alimenter les systèmes de modélisation permettant de prévoir l'irradiance solaire au sol disponible sur une zone donnée, déterminante pour le potentiel de production solaire d'un site. Bien que cet aspect ne soit pas étudié dans la présente évaluation, les données d'observation de la Terre fournies par Copernicus sont de plus en plus fréquemment mises à contribution pour identifier la source d'énergie renouvelable la plus appropriée dans une zone donnée, et contribuant ainsi à une transition énergétique plus efficace.

## B. Réduction des erreurs de prévision de la production d'énergies éolienne et solaire, donc des ajustements nécessaires entre l'offre et la demande

En raison de la thermosensibilité de la consommation d'électricité et des marges d'erreur importantes des prévisions de production (notamment pour la production photovoltaïque, qui souffre du manque de systèmes de mesure dans les fermes de petites dimensions<sup>64</sup>), il est essentiel 1) de prévoir des mécanismes d'ajustement solides, et 2) d'améliorer les prévisions de l'offre et de la demande. En France, RTE (Réseau de transport d'électricité) assure le fonctionnement du réseau de transport d'électricité en temps réel et garantit la sécurité de l'approvisionnement (en ajustant en permanence l'offre et la demande).

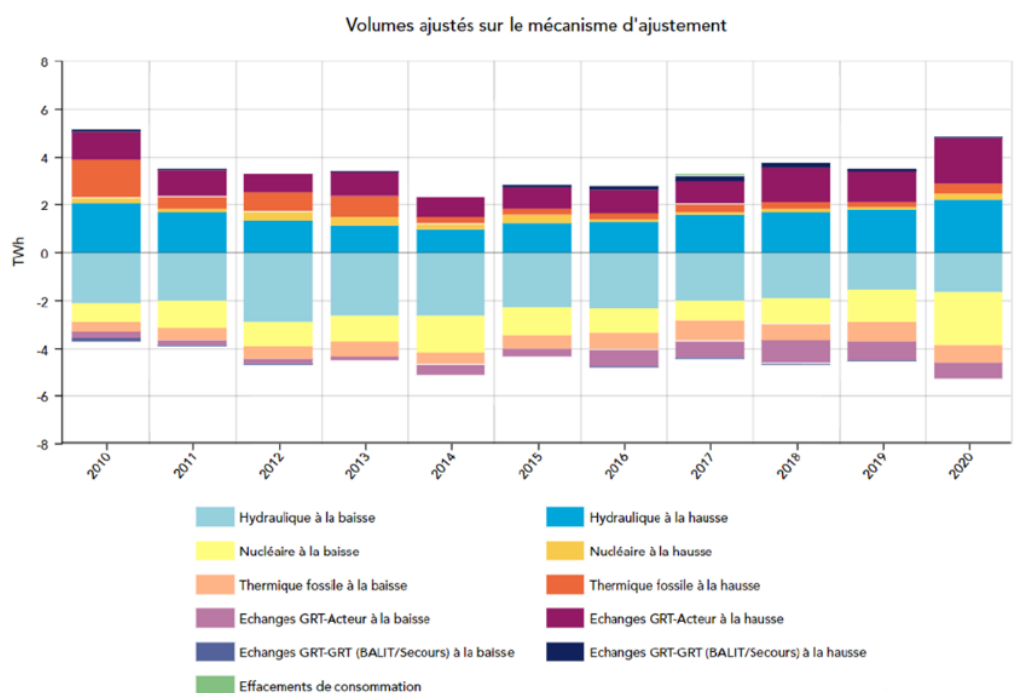
Comme il n'est jusqu'à présent pas possible de stocker l'électricité de façon massive, un excès de demande à un moment donné ne peut être compensé par un excès d'offre quelques heures auparavant. Ainsi, dans une situation de production supérieure à la demande, des exportations coûteuses ou des ajustements à la baisse (requérant par exemple la fermeture d'une centrale nucléaire) devront être envisagés. À l'inverse, les pics de consommation en hiver ou les baisses inattendues de la production, comme celles qui se produisent en été lorsque les températures élevées obligent à fermer les centrales, engendrent une demande supérieure à l'offre. **Ces déséquilibres peuvent entraîner l'activation de divers mécanismes de réserve ou nécessiter de recourir à des importations.** Les importations d'électricité pèsent sur l'économie française, dont elles aggravent le déficit énergétique, et font appel à des productions davantage émettrices de GES (par exemple issues des centrales à charbon allemandes). **Sauf lorsque des sources d'énergie renouvelables (barrages hydroélectriques ou parcs éoliens d'autres pays, par exemple) sont utilisées pour combler le déficit de production, les situations d'ajustement à la hausse conduisent à la mobilisation des sources d'énergie les plus chères et les plus polluantes (charbon, gaz, etc.), en France comme à l'étranger.** L'énergie nucléaire est peu employée comme source d'ajustement à la hausse ; elle sert le plus souvent de source d'ajustement à la baisse.

Le graphique ci-dessous, tiré du bilan électrique 2020 de RTE, présente les volumes ajustés de 2010 à 2020, par source de production. L'année 2020 est celle qui a nécessité le plus d'ajustements en volume, à hauteur de 10,1 TWh, soit 2,3 % de la consommation française.

---

<sup>64</sup> Source : entretiens avec des représentants de RTE.

Figure 18 : Volumes ajustés à la hausse et à la baisse sur le réseau d'électricité français



L'année 2020 ayant été très particulière du fait de la pandémie mondiale de covid-19, nous examinons l'année 2019 pour illustrer l'impact potentiel des prévisions météorologiques sur la réduction des ajustements nécessaires entre l'offre et la demande, lesquels mobilisent en partie des sources d'énergie polluantes. Cela concerne les situations dans lesquelles un ajustement à la hausse est nécessaire pour compenser l'excès de demande par rapport à l'offre<sup>65</sup>. RTE laisse le marché de l'électricité fonctionner seul jusqu'à deux heures en amont du temps réel : ce sont les « responsables d'équilibre » qui sont chargés de prévoir la consommation d'électricité au sein de leur périmètre d'équilibre et d'acheter de l'énergie aux divers producteurs en fonction de l'évolution de la demande. Si cela ne suffit pas, RTE intervient dans une fenêtre dite « en temps réel » (jusqu'à deux à trois heures en amont) pour augmenter rapidement le niveau de production d'énergie en intensifiant la production de certaines sources ou en important la production de pays voisins (Royaume-Uni, Allemagne, Suisse, Italie, Espagne). Nous observons dans le graphique ci-dessus qu'en 2019 (et cela est également vrai pour les autres années), la moitié des ajustements à la hausse décidés par RTE ont sollicité la production hydraulique (la plus facile à mobiliser rapidement et en quantités importantes). Environ 5 % de ces ajustements ont été réalisés grâce à la production thermique fossile nationale (charbon, pétrole et gaz naturel) et 36 % grâce à des importations en provenance des pays voisins<sup>66</sup>, soit respectivement 0,18 TWh et 1,29 TWh de production supplémentaire cumulée ayant permis d'ajuster le marché au cours de l'année.

La production des énergies éolienne et solaire étant intermittente et donc en partie imprévisible, RTE établit ses propres prévisions de production en utilisant son réseau IPES<sup>67</sup>, alimenté par des algorithmes et des prévisions de divers services météorologiques, dont Météo-France (ARPEGE) et le CEPMMT. Les stations météorologiques françaises sont également essentielles pour RTE car elles permettent d'obtenir des données à une fréquence plus élevée que les modèles à l'échelle mondiale (ARPEGE, CEPMMT). Ce réseau permet d'anticiper la production attendue des fermes solaires et des parcs éoliens français heure par heure, pour le

<sup>65</sup> Les ajustements à la baisse (qui se produisent lorsque l'offre est excédentaire, par exemple du fait que la production d'énergie éolienne a été sous-estimée) n'ont pas de conséquences négatives sur l'environnement : la production excédentaire est exportée, celle des autres sources (essentiellement des centrales hydrauliques et nucléaires) est ralentie, ou les centrales hydrauliques fonctionnent en mode pompage. Les problèmes découlant des ajustements à la baisse sont d'ordre financier.

<sup>66</sup> Importations figurant en violet sur le graphique, avec la légende « Echanges GRT-Acteur à la hausse », « GRT-Acteur » désignant les gestionnaires de réseau de transport européens.

<sup>67</sup> Insertion de la production éolienne et photovoltaïque sur le système, en service depuis 2009.

jour même et le lendemain, et de mieux gérer les ressources à mettre en œuvre pour assurer l'équilibre du marché.

Bien que les causes d'une situation de demande excédentaire puissent être nombreuses (vagues de froid entraînant une augmentation de la consommation destinée au chauffage domestique, mouvements sociaux affectant les installations de production, canicules nécessitant de réduire la production des centrales nucléaires, contraintes environnementales...), nous nous concentrons ici sur le problème des erreurs d'anticipation (surestimation) de la production solaire ou éolienne, qui sont en lien direct avec les prévisions météorologiques.

En utilisant un modèle fondé sur les données fournies par RTE et l'AIE et en nous appuyant sur les hypothèses **présentées à l'**

**Annexe C.4 : Réduction des émissions de GES résultant d'une diminution des erreurs de prévision de la production d'énergie éolienne, nous avons calculé un ordre de grandeur des émissions de CO<sub>2</sub> évitées en 2019 du fait du moindre volume d'ajustements dus à une surestimation de la production d'énergie éolienne.** Notre estimation porte sur les ajustements réalisés au moyen de sources thermiques fossiles nationales et étrangères et représente la part des erreurs et émissions de CO<sub>2</sub> évitées que l'on peut attribuer à la qualité des prévisions météorologiques fournies par Météo-France avec l'appui du CEPMMT et d'EUMETSAT (par rapport à notre scénario contrefactuel).

#### Scénario contrefactuel

RTE aurait accès aux prévisions américaines, offrant une résolution de 28 km à court terme et de 70 km à moyen terme. **Compte tenu de la nécessité de disposer de prévisions météorologiques sur des zones de très faible étendue (installations de production) et de l'hétérogénéité probable des phénomènes de vent et de nébulosité (notamment dans les zones dont le relief est inégal ou à proximité d'un littoral), RTE disposerait d'un modèle de prévision inefficace** (produisant une quantité d'erreurs beaucoup plus importante) et devrait procéder à des ajustements plus fréquents entre l'offre et la demande, avec un recours partiel aux sources thermiques fossiles.

Le modèle présenté en annexe est fondé sur l'hypothèse que le niveau de précision des modèles actuellement utilisés réduit les erreurs de prévision de la production d'énergie éolienne de 10 à 20 % par rapport à notre scénario contrefactuel<sup>68</sup>. Nous estimons que, grâce à la précision des prévisions météorologiques des organisations étudiées, **les erreurs évitées (qui auraient nécessité la mise en œuvre des mécanismes d'ajustement) se chiffrent entre 0,15 TWh et 0,3375 TWh par an, dont 0,008 à 0,017 TWh potentiellement ajusté par des sources fossiles nationales et 0,021 à 0,041 TWh par une production d'énergie fossile importée. Cela représente entre 18 000 et 40 000 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> évitées en 2019.**

Il n'est pas possible d'effectuer ce type d'estimation des impacts environnementaux dans le cas de la production d'énergie solaire car les données disponibles sur cette production manquent de fiabilité. RTE a beaucoup de mal à se procurer des données de production précises<sup>69</sup>, notamment concernant les fermes solaires de faible étendue et l'habitat privé qui ne disposent pas de systèmes de mesure fiables. Toutefois, comme nous l'avons déjà vu, les prévisions sont encore plus difficiles et incertaines en ce qui concerne l'ensoleillement et la couverture nuageuse que pour l'éolien. Nous pouvons donc raisonnablement penser que l'absence de prévisions suffisamment fines à l'échelle locale induirait un taux d'erreur accru par rapport au niveau actuel, probablement déjà assez élevé, et un recours plus important aux sources fossiles pour compenser ces erreurs.

#### C. Autres sources d'énergie

Les autres sources d'énergie renouvelables (hydroélectricité, biomasse, géothermie, énergie marémotrice, énergie houlomotrice, etc.) sont également sensibles aux conditions météorologiques. L'hydroélectricité dépend des prévisions hydrologiques (disponibilité des ressources en eau) moyennes et saisonnières, cependant que la biomasse pose certainement un certain nombre de défis en matière de projections climatiques. En outre, les sources d'énergie non renouvelables peuvent également être sensibles aux conditions météorologiques, bien que dans une moindre mesure. C'est notamment le cas de l'énergie nucléaire, comme nous le verrons plus loin.

<sup>68</sup> RTE, que nous avons interrogé à ce sujet, nous a confirmé que le taux d'erreur dans les prévisions de production d'énergie éolienne serait probablement plus élevé dans l'hypothèse de l'utilisation du modèle GFS. Nous ne disposons pas d'un taux d'erreur précis pour ce modèle, mais nous considérons qu'il appartient à la catégorie des modèles « de fidélité moyenne à basse » selon la classification de Wang *et al.* (2019) (voir annexe C.4).

<sup>69</sup> Source : entretiens avec des représentants de RTE.

*i. Rôle des prévisions météorologiques dans la gestion de la production hydraulique et des barrages*

De fortes précipitations en montagne peuvent provoquer d'importantes inondations dans les vallées et jusque dans les plaines, notamment dans les zones urbaines. Dans les vallées, les dommages environnementaux peuvent être considérables, affectant notamment la faune (sauvage et domestique), mais aussi les sols et la flore.

Électricité de France (EDF), entreprise française de production et de fourniture d'électricité détenue à plus de 80 % par l'État français, exploite et gère des barrages hydroélectriques situés dans des vallées. En cas de fortes précipitations, les bassins versants des principaux cours d'eau peuvent être inondés en quelques heures ou quelques jours. Lorsqu'un barrage est concerné, EDF doit assurer la sécurité de l'ouvrage en évitant une surcharge qui risquerait de le submerger ou d'exercer une pression trop forte et de provoquer sa rupture. Un tel événement serait catastrophique pour la population en aval ainsi que pour la biodiversité de la vallée. Pour prévenir ce risque, les barrages sont équipés de déversoirs, qui dérivent ou évacuent l'eau retenue derrière le barrage lorsque son niveau dépasse une certaine limite. En outre, les grands barrages comme celui du Crescent avec son réservoir de plus de 14 millions de m<sup>3</sup>, construit pour éviter les crues à Paris, peuvent aussi contribuer à limiter les risques d'inondation. Ces ouvrages nécessitent une étroite surveillance du vent, des orages, des probabilités de précipitations extrêmes et de chute de neige, des débits fluviaux – sur une période de quelques heures à quelques jours – et du remplissage des réservoirs par la pluie et la fonte des neiges. Depuis plusieurs décennies, des équipes spécialisées chez EDF collectent et analysent en permanence les mesures et produisent des alertes à l'intention des exploitants en cas de risque d'inondation. **Ces équipes utilisent les données fournies par Météo-France et les stations hydrométéorologiques situées dans les bassins versants où se trouvent les barrages. En d'autres termes, en l'absence des données de Météo-France, les prévisions des risques d'inondations par EDF seraient moins précises, donc le danger pour la sécurité des barrages plus grand.**

Il est très probable que des ruptures de barrage ou des accidents similaires se produiraient, avec des conséquences dévastatrices sur l'environnement (**animaux et plantes noyés, destruction d'habitats de la faune sauvage, perte de terre arable avec sa couverture végétale, dispersion en aval de débris et matières dangereuses susceptibles d'endommager les écosystèmes locaux, dégradation des zones humides et des champs agricoles, érosion des sols, etc.**). En effet, les exploitants des barrages anticiperaient les niveaux d'eau en fonction des observations passées ou des tendances saisonnières. Ainsi, il est probable qu'ils stockeraient d'important niveaux au printemps, prévoyant un climat sec en été<sup>70</sup>. Cependant, en cas de fortes pluies après le remplissage d'un lac de barrage, ils seraient obligés de procéder à une opération dangereuse de lâcher d'eau en urgence et le barrage risquerait de se rompre sous l'effet de la forte pression, provoquant des dommages supplémentaires en aval de grande ampleur.

*ii. Rôle des prévisions météorologiques dans la gestion des centrales nucléaires lors des canicules*

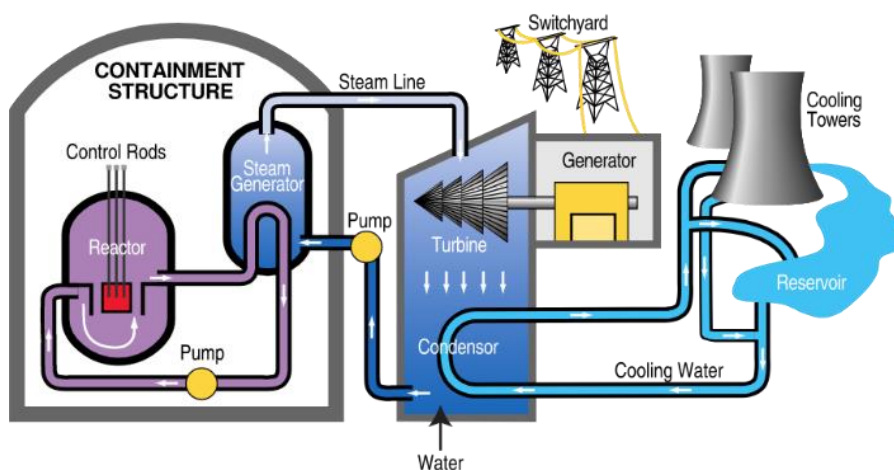
La production d'électricité non renouvelable peut elle aussi être sensible aux conditions météorologiques. **Les centrales nucléaires sont largement dépendantes des sources d'eau pour leur refroidissement.** C'est pourquoi elles sont généralement construites au bord d'un cours d'eau ou sur un littoral.

La raison pour laquelle une source d'eau est nécessaire pour la production d'énergie nucléaire est simple : de la vapeur d'eau est produite pour faire fonctionner la turbine et fournir de l'électricité au réseau via l'alternateur. Lorsque le titre de la vapeur (sa « qualité ») descend en dessous d'un certain seuil, celle-ci ne peut plus être utilisée pour la production d'électricité ; elle est alors refroidie jusqu'à redevenir de l'eau, qui sera réemployée pour produire à nouveau de la vapeur avec un titre élevé. Ce refroidissement de la vapeur a

<sup>70</sup> *Environment and self-endangered man*, J.V. Amin (2009), page 29.

lieu à l'intérieur d'un circuit secondaire, dans le condenseur, et nécessite de grandes quantités d'eau de refroidissement, laquelle circule dans un troisième circuit, le circuit de refroidissement. Après son utilisation dans la centrale, l'eau de refroidissement passe dans une tour aéroréfrigérante avant d'être réutilisée, ou est directement rejetée dans le cours d'eau ou la mer. **L'eau qui a été utilisée comme eau de refroidissement s'est réchauffée et contient donc moins d'oxygène, ce qui est nocif pour la faune, notamment les poissons.** Lorsque l'eau prélevée dans le cours d'eau est déjà plus chaude que d'habitude en raison de la température de l'air, la température de l'eau rejetée dans l'environnement peut s'avérer dangereuse pour la biodiversité.

Figure 19 : Circuits d'eau dans une centrale nucléaire



Source : Wikipedia

Légende :	
CONTAINMENT STRUCTURE	ENCEINTE DE CONFINEMENT
Control Rods	Barres de contrôle
Steam Generator	Générateur de vapeur
Reactor	Réacteur
Pump	Pompe
Steam Line	Conduite de vapeur
Turbine	Turbine
Condensor	Condenseur
Water	Eau
Generator	Générateur
Cooling Water	Eau de refroidissement
Switchyard	Transformateur
Cooling Towers	Tours aéroréfrigérantes
Reservoir	Réservoir

Description : L'eau est chauffée par la fission des atomes d'uranium dans le cœur du réacteur et maintenue sous haute pression, ce qui l'empêche de bouillir. Cette eau produit de la vapeur par transfert de la chaleur à une source d'eau secondaire. La vapeur est utilisée pour générer de l'électricité. L'eau du cours d'eau refroidit la vapeur qu'elle condense en eau, puis elle est rejetée directement dans le cours d'eau ou refroidie dans les tours et réutilisée dans la centrale.

**Des réglementations environnementales<sup>71</sup> interdisent ou limitent l'activité des centrales lorsque l'eau de refroidissement dépasse un certain seuil de température au moment de son rejet** (seuil variable selon les régions, généralement compris entre 25 et 28 °C). Certaines centrales sont donc amenées à arrêter leur production lors de canicules qui font monter la température du cours d'eau avant même son utilisation dans la centrale. Les centrales en bord de mer sont moins concernées car leurs rejets sont dilués par de puissants courants marins et l'eau « chaude » rejetée au fond de la mer remonte rapidement à la surface par convection, ce qui réduit son impact sur les organismes vivant au fond de la mer.

<sup>71</sup> Voir [https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/impact-secheresse-centrale/Pages/Impact-secheresse-fonctionnement-centrales.aspx#.YZPM3WCZM2w](https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/impact-secheresse-centrale/Pages/Impact-secheresse-fonctionnement-centrales.aspx#.YZPM3WCZM2w) et l'arrêté du 26 novembre 1999, article 17 : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000762255/>.



**D'autres réglementations s'appliquent aux périodes de sécheresse, lorsque le niveau des cours d'eau est à son minimum et que leur débit est faible (restrictions des prélèvements d'eau).** En cas de niveau trop faible, les centrales nucléaires doivent réduire ou arrêter leur production, en particulier si une période de sécheresse durable est attendue, afin d'éviter d'assécher le cours d'eau en aval, ce qui serait fatal aux espèces aquatiques de cet écosystème.

**Météo-France fournit des alertes précoces sur les canicules et des prévisions de température qui permettent à EDF (l'exploitant de toutes les centrales nucléaires en France) d'anticiper la montée des températures des cours d'eau et les situations de sécheresse (entraînant une baisse des niveaux d'eau également dangereuse pour la biodiversité).** Étant donné qu'EDF doit se conformer à la réglementation environnementale, elle surveille régulièrement les températures et les débits des cours d'eau ainsi que les prévisions de température de l'air. **Lorsque des canicules sur plusieurs jours ou plusieurs semaines sont annoncées, certaines centrales peuvent être arrêtées** quelques jours en été pour respecter la réglementation, **ce qui évite des dommages à la faune et à la flore aquatiques en aval.**

En 2019, Météo-France a annoncé une période de fortes températures de l'air, ayant conduit à une augmentation considérable des températures des cours d'eau en France. En conséquence, EDF a arrêté les deux réacteurs de la centrale de Golfech (Tarn-et-Garonne) pendant plus d'une semaine<sup>72</sup>. Les prévisions d'évolution de la canicule ont alors été essentielles pour qu'EDF puisse anticiper la hausse des températures des cours d'eau et décider si d'autres centrales nucléaires devaient également être arrêtées.

Il est probable que le modèle américain GFS pourrait être utile dans des situations telles que les canicules, car ce sont généralement des événements météorologiques mondiaux affectant de larges territoires. Cependant, le modèle GFS est moins fiable que ceux de Météo-France et du CEPMMT ; il apporterait donc moins de précision dans les prévisions des températures et de la durée des canicules, ce qui compliquerait les anticipations et les décisions d'EDF.

---

<sup>72</sup> Source : Agence France Presse (AFP) et Le Figaro : <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/fin-de-la-canicule-la-centrale-nucleaire-de-golfech-redemarre-20200813?web=1&wdLOR=c8855CBA2-A8F7-44D5-AEB7-35A1066B1254>.

### 3. Zones maritimes et autres zones aquatiques

#### A. Optimisation du routage des navires pour le transport maritime

Le terme « transport maritime » désigne le transport de marchandises ou de passagers par navire. Ce mode de transport constitue l'épine dorsale du commerce mondial : il représente **près de 90 % du transport mondial de marchandises**<sup>73</sup>. Différents types de marchandises sont ainsi transportés : vrac liquide (pétrole, gaz, produits chimiques), vrac sec (céréales, minerais, produits semi-finis) et toutes sortes de produits manufacturés transportés dans des conteneurs – l'unité de mesure des conteneurs étant l'équivalent vingt pieds (EVP) (un conteneur standard de vingt pieds de long compte pour 1 EVP). Le transport des passagers et des différents types de marchandises nécessite des navires spécialisés (vraquiers, pétroliers, rouliers, porte-conteneurs, transbordeurs (rouliers passagers), etc.).

En 2017, le nombre total de navires immatriculés (vraquiers, pétroliers, porte-conteneurs, navires ravitailleurs de plateforme, cargos, transporteurs de gaz liquéfié, chimiquiers et autres navires, y compris transbordeurs) s'élevait à **50 155 dans le monde, dont 452 appartenant à des armateurs français**<sup>74</sup>. Les ports français reçoivent du fret de navires français mais aussi de navires venant du monde entier (un navire marchand accoste dans un port français toutes les 6 minutes, selon Armateurs de France).

Les routes maritimes ne sont pas matérialisées de la même manière que le sont les routes terrestres, mais elles sont souvent cartographiées, à différentes échelles. Elles apparaissent et évoluent pour répondre à diverses contraintes : météorologie, géographie côtière, relief marin, infrastructures portuaires, sécurité ou facteurs politiques. Les cartes ci-dessous montrent les principales routes maritimes suivies par les navires et mettent en évidence la complexité et la dimension internationale du transport maritime.

Figure 20 : Positions des navires, obtenues par satellite le 20 octobre 2021 aux environs de 11 heures



Source : [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com)<sup>75</sup>

<sup>73</sup> Source : Armateurs de France.

<sup>74</sup> Source : [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2017ch2\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2017ch2_en.pdf).

<sup>75</sup> Source : [www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com).

Figure 21 : Grandes routes maritimes



Source : Chatham House Report<sup>76</sup>

Légende :	
US inland waterways and rail network	Voies de navigation intérieure et réseau ferroviaire des États-Unis
US Gulf Coast ports	Ports de la Côte du Golfe des États-Unis
Panama Canal	Canal de Panama
Brazil's inland road network	Réseau routier du Brésil
Brazil's southern ports	Ports du Sud du Brésil
Dover Strait	Détroit de Douvres
Strait of Gibraltar	Détroit de Gibraltar
Black Sea rail network	Réseau ferroviaire de la mer Noire
Black Sea ports	Ports de la mer Noire
Turkish Straits	Détroits de Turquie
Suez Canal	Canal de Suez
Strait of Bab al-Mandab	Détroit de Bab al-Mandab
Strait of Hormuz	Détroit d'Ormuz
Strait of Malacca	Détroit de Malacca
Type	Plaque tournante
Maritime	Maritime
Costal	Côtière
Inland	Terrestre
Major shipping routes	Grandes routes maritimes
Core route	Route principale
Secondary route	Route secondaire

**Le trafic maritime a des conséquences importantes sur l'environnement. Ses émissions de GES représentent 2,89 % du total des émissions mondiales (en équivalent CO<sub>2</sub>).** Ce chiffre englobe le transport maritime international et national et la pêche, et représentait 755 millions de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> en 2018 (Armateurs de France<sup>77</sup>). Les émissions proviennent principalement de la combustion de combustibles fossiles (pétrole) par l'appareil propulsif principal, les moteurs auxiliaires et les chaudières. On observe toutefois que les émissions du transport maritime ont baissé de 5 % au cours de la dernière décennie (de 794 millions de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> en 2008 à 755 millions en 2018). Bien qu'il n'existe pas encore de solution technologique mature de propulsion décarbonée des navires, des progrès dans l'**optimisation du routage** ont été réalisés et ont contribué à la diminution des émissions du secteur (du fait de la réduction de la vitesse des navires, du moindre nombre de détours effectués, etc.).

Selon une évaluation socio-économique du CEPMMT (Citizing, 2017), l'optimisation du routage des navires est l'une des opérations les plus importantes affectant l'exploitation d'un navire, sa sécurité et les aspects économiques du transport. Plusieurs critères sont pris en compte dans le choix de l'itinéraire optimal, notamment un temps de trajet minimal, une consommation minimale de combustible pour un temps de trajet

<sup>76</sup> Source : *Chokepoints and Vulnerabilities in Global Food Trade*, Chatham House Report (2017).

<sup>77</sup> Source : [https://www.armateursdefrance.org/sites/default/files/decryptages/emissions\\_des\\_ges\\_par\\_le\\_transport\\_maritimev2.pdf](https://www.armateursdefrance.org/sites/default/files/decryptages/emissions_des_ges_par_le_transport_maritimev2.pdf).

donné, et la sécurité du navire et de la cargaison. Par exemple, en cas de fortes intempéries, les navires verront leur vitesse réduite du fait de la résistance accrue du vent et des vagues. En outre, le gros temps augmente les risques en matière de sécurité de l'équipage et de dommages causés par les mouvements excessifs du navire, le tossage, ou l'eau déferlant sur les ponts. Lorsque les navires entrent dans des zones de bourrasques ou dans des champs de vent plus fort, ils deviennent plus difficiles à manœuvrer et les itinéraires possibles sont donc moindres. **L'optimisation du routage consiste à identifier le meilleur itinéraire pour un navire en fonction des prévisions météorologiques existantes**, des caractéristiques du bâtiment et des besoins liés au fret. L'objectif n'est pas d'éviter toutes les conditions défavorables, mais de trouver **le meilleur équilibre possible permettant de minimiser le temps de trajet et la consommation de combustible** tout en préservant le navire des risques météorologiques et en assurant la sécurité de l'équipage. Ce qui est visé n'est donc pas toujours de réduire le temps de trajet ; ce peut être de réduire la consommation de combustible ou de respecter les horaires programmés.

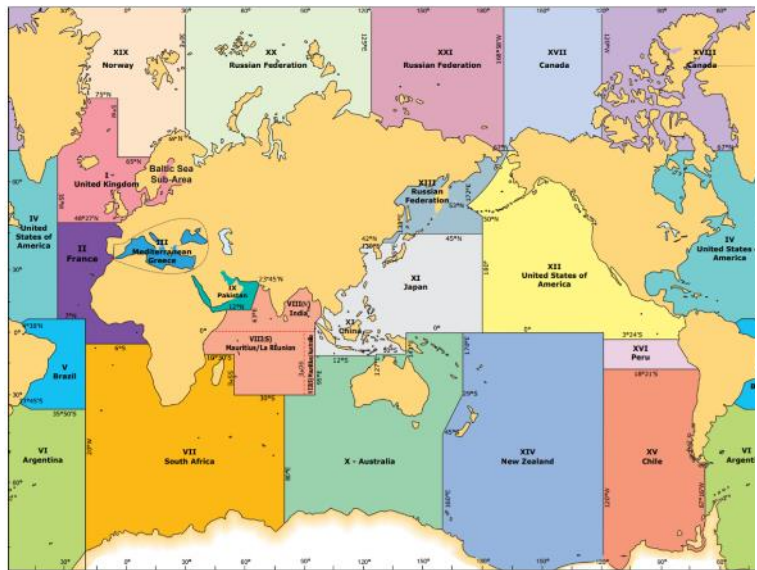
**Les prévisions à court et moyen terme sont régulièrement mises à contribution pour le routage des navires.** Des prévisions météorologiques précises sont essentielles pour permettre aux décideurs de choisir l'itinéraire et la programmation horaire (une programmation horaire précise peut aider à réduire les coûts de combustible et les émissions) et de décider en temps réel de l'ajustement de la vitesse du navire en fonction des conditions météorologiques rencontrées (vent, vagues, intempéries...), afin d'économiser du combustible et de réduire les émissions.

Diverses études (Fearnleys, 2002, Bowditch, 2002) ont montré que **les économies de combustible dues à l'optimisation du routage des navires sont comprises dans des fourchettes pouvant aller de 2 à 4 % jusqu'à 8 à 10 % selon le type de navire, la saison et la zone maritime**. Selon un rapport de l'OMI (2000), **le routage météorologique peut réduire de 2 à 4 % la consommation de combustible et les émissions de CO<sub>2</sub>**. Un article paru dans la revue TradeWinds, datant de juillet 2010, rapporte le point de vue du grand opérateur de chimiquiers Odfjell, peu après le contrat conclu avec la société américaine Applied Weather Technology (AWT) pour 65 de ses bâtiments : « **la société affirme avoir économisé près de 500 000 USD de combustible et avoir réduit ses émissions de CO<sub>2</sub> de 3 000 tonnes en trois mois, grâce à un routage plus efficace** ».

Ces données fournissent des ordres de grandeur intéressants. Cependant, en raison de l'absence de données sur la consommation mondiale de combustibles par les navires et du fait que le rôle de Météo-France se concentre sur des zones très spécifiques (voir ci-dessous) alors que le transport maritime est une activité mondialisée, nous ne pouvons pas fournir une estimation des coûts de combustible évités qui pourrait résulter du routage optimisé des navires grâce aux prévisions météorologiques.

L'Organisation météorologique mondiale (OMM), qui gère la coopération entre les services météorologiques nationaux à l'échelle mondiale, a divisé les zones maritimes (océans et mers) de la planète en 21 zones météorologiques, appelées METAREAS (l'affectation de ces zones aux services météorologiques des différents pays est illustrée sur la figure ci-contre). Dans chaque zone, le service météorologique national concerné est chargé de fournir des prévisions ainsi que d'autres services de météorologie marine à toute la communauté maritime. **Météo-France produit et coordonne la diffusion des bulletins de prévisions marines dans la zone METAREA II** pour le compte du Système mondial de détresse et de sécurité en mer (SMDSM), et produit également des bulletins météorologiques en anglais en Méditerranée occidentale et en Manche. Météo-France est un centre spécialisé de météorologie marine et de prévision des vagues de l'OMM.

Figure 22 : Limites des zones météorologiques (METAREAS)



Source : OMM

Légende :

I	Royaume-Uni	XI	Chine – Japon
II	France	XII	États-Unis
III	Grèce	XIII	Russie
IV	États-Unis	XIV	Nouvelle-Zélande
V	Brésil	XV	Chili
VI	Argentine	XVI	Pérou
VII	Afrique du Sud	XVII	Canada
VIII-S	Maurice/La Réunion	XVIII	Canada
VIII-N	Inde	XIX	Norvège
IX	Pakistan	XX	Russie
X	Australie	XXI	Russie

L'établissement Météo-France est également chargé du suivi de l'activité cyclonique dans le sud-ouest de l'océan Indien : le centre de Météo-France de l'île de la Réunion, situé à Saint-Denis, est depuis 1993 centre de référence pour la zone cyclonique du sud-ouest de l'océan Indien, qui comprend l'Afrique de l'Est et les îles de l'océan Indien. Météo-France produit à la fois des bulletins réguliers (BMR) et des bulletins météorologiques spéciaux (BMS) diffusés en cas de conditions de vent et d'état de la mer, à partir de l'avis de « grand frais ». Ces bulletins sont diffusés en mer par les centres régionaux opérationnels de surveillance et de sauvetage (CROSS) opérés par la direction des affaires maritimes.

Figure 23 : Zones couvertes par Météo-France



Source : réalisé par les auteurs

- prévisions atmosphériques : grâce à ses modèles AROME et ARPEGE, couplés aux prévisions à moyen terme du CEPMMT (particulièrement précises sur les océans, moins en Méditerranée) ;
- prévisions des vagues : grâce au modèle MFWAM développé conjointement avec le CEPMMT, offrant une résolution de l'ordre de 10 km, avec des configurations régionales de ce modèle sur la France, les Antilles, l'océan Indien, la Polynésie française et la Nouvelle-Calédonie offrant des résolutions de 2 à 10 km ; et grâce aux modèles fins de prévision des vagues pour le domaine côtier, d'une résolution de 100 à 200 m près des côtes, sur les façades métropolitaines Atlantique et Méditerranée et sur les Antilles, la Guyane et l'océan Indien.

Pour illustrer le potentiel des prévisions météorologiques de Météo-France en matière de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, prenons l'exemple d'un porte-conteneurs français moyen transportant 7 695 EVP, partant du Havre à destination des États-Unis. Ce fret correspond à un équivalent moyen d'environ 75 000 tonnes de marchandises (source : ministère français de la transition écologique). La distance couverte par Météo-France sur le trajet entre la France et les États-Unis est d'environ 2 400 km. Le ministère français de la transition écologique et l'Ademe proposent un guide méthodologique<sup>79</sup> qui établit des facteurs d'émission en fonction de la distance parcourue ainsi que de la nature et de la capacité du navire. Selon ce guide, un porte-conteneurs transportant plus de 7 500 EVP consomme environ 210 kg de fioul lourd par kilomètre et émet environ 10 g CO<sub>2</sub>/t.km. Comme nous l'avons vu précédemment, l'OMI a constaté que le routage météorologique est susceptible de réduire de 2 à 4 % les émissions de CO<sub>2</sub>. **Par conséquent, dans notre exemple, l'optimisation du routage du navire sur la base des prévisions marines de Météo-France pourrait permettre d'éviter l'émission de 36 à 72 tonnes de CO<sub>2</sub><sup>80</sup> sur la partie de l'itinéraire concernée.**

Nous ne pouvons pas agréger les données à l'échelle de tous les trajets passant par les zones couvertes par Météo-France, mais **nous pouvons fournir un petit ordre de grandeur de l'impact que pourrait avoir l'optimisation du routage.** La superficie totale des mers et des océans est de 361 millions de km<sup>2</sup>. Nous avons estimé les zones couvertes par Météo-France à environ 37 millions de km<sup>2</sup>, soit un peu plus de 10 % de la surface maritime du globe. Si l'on prend comme exemple les émissions totales du transport maritime en 2018,

<sup>78</sup> La zone VIII est partagée avec Maurice. Météo-France est également chargée des prévisions concernant la Méditerranée occidentale (le reste de la Méditerranée étant affecté à la Grèce). La carte de la figure 23 a été produite à partir de coordonnées GPS précises des zones couvertes par Météo-France.

<sup>79</sup> Voir [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/86275\\_7715-guide-information-co2-transporteurs.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/86275_7715-guide-information-co2-transporteurs.pdf).

<sup>80</sup> 2 à 4 % x (2 400 km x 75 000 tonnes x 10 g CO<sub>2</sub>/ 1 000 000) = 36 à 72 tonnes de CO<sub>2</sub>.

s'élevant à 755 millions de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>, et si l'on considère (sur la base du rapport de l'OMI précédemment mentionné) que le routage météorologique est susceptible de réduire les émissions de 2 à 4 %, on peut conclure que, sans les prévisions météorologiques, les émissions mondiales auraient atteint 770 à 785 millions de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>. **En supposant que la contribution de Météo-France à ces émissions évitées est proportionnelle à sa couverture de la surface maritime (10 %), nous arrivons à un résultat de 1,5 à 3 millions de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> évités en 2018 qui peuvent être imputés aux prévisions de Météo-France (soit l'équivalent de 0,2 à 0,4 % du total des émissions du transport maritime).** Ce résultat doit être pris avec précaution car le chiffre de 10 % correspond à la part de la surface maritime couverte par Météo-France, qui ne coïncide pas avec la part des trajets couverts. Ainsi, Météo-France couvre une partie de la Méditerranée relativement petite mais d'une haute importance stratégique et très fréquentée. Par conséquent, **ce résultat peut être considéré comme une limite inférieure de la contribution de Météo-France, car cette dernière couvre probablement plus de 10 % du trafic maritime.**

En l'absence de Météo-France, il est presque certain qu'un autre organisme météorologique national aurait été chargé de fournir des prévisions sur ces zones, étant donné que le transport maritime représente un intérêt international. Il est toutefois impossible de savoir quel pays aurait assuré ce service et il n'est pas certain que le niveau de qualité des prévisions fournies aurait été aussi élevé que celui offert par Météo-France. **Ce qu'il faut retenir, c'est que les activités de prévisions météorologiques sont essentielles pour les opérateurs de navires et contribuent à réduire les émissions GES.** Nous avons vu que Météo-France et le CEPMMT sont des acteurs importants dans ce domaine, en raison de leur couverture de plusieurs régions maritimes stratégiques du globe.

L'optimisation des itinéraires des aéronefs grâce aux prévisions météorologiques et son rôle dans la réduction de la consommation de carburant et donc des émissions de CO<sub>2</sub> auraient également pu être mis en avant. Toutefois, l'activité de prévision de Météo-France destinée au secteur de l'aviation en France est financée par des taxes aéronautiques et non par des subventions publiques, ce qui l'exclut du champ d'application de la présente évaluation.

## B. Gestion des marées noires

Les prévisions météorologiques et les données d'observation de la Terre sont également très utiles aux autorités responsables des actions de nettoyage lors de déversements d'hydrocarbures en mer (causés, par exemple, par des accidents de navires, des incendies sur des plateformes pétrolières, etc.). De telles actions ne permettent pas de prévenir totalement les conséquences écologiques de ces pollutions marines, mais de **les atténuer en éliminant autant que possible la substance toxique** (pétrole, gaz, produits chimiques...), **aussi rapidement que possible**, avant qu'elle n'affecte une grande partie de la biodiversité (tant marine que terrestre).

Le terme « marée noire » désigne un déversement d'hydrocarbures liquides dans l'environnement, en particulier en milieu marin, ayant pour origine une activité humaine ; il s'agit d'une forme de pollution. Le terme est généralement utilisé pour désigner les déversements se produisant en mer ou dans les eaux côtières, mais ces derniers peuvent également se produire sur terre. Les produits déversés lors des marées noires peuvent être du pétrole brut provenant de navires pétroliers, de plateformes en mer ou d'installations mobiles et de puits de forage, des produits pétroliers raffinés (comme l'essence, le diesel), des produits résiduels issus du raffinage (combustibles plus lourds utilisés par les grands navires comme les combustibles de soute), ou encore des déchets huileux ou huiles usagées. (Citizing, 2017)

Les déversements d'hydrocarbures dans les eaux côtières sont des catastrophes environnementales qui affectent gravement les écosystèmes, la pêche et l'économie. Bien que le nombre de déversements de grande ampleur (plus de 700 tonnes) ait diminué, les marées noires restent un problème majeur pour les milieux marins. Échouements et collisions de pétroliers sont les principales causes des déversements de grande ampleur, représentant 64 % des cas entre 1970 et 2010<sup>81</sup>. Les conditions météorologiques ne font pas partie des causes d'accident des navires-citernes en mer, mais elles jouent un rôle important dans la façon dont l'hydrocarbure se déverse et dont sa trajectoire évolue, et elles sont déterminantes dans le choix des méthodes de nettoyage. Par exemple, certaines mesures d'intervention contre les marées noires devront parfois être abandonnées du fait de conditions météorologiques défavorables. Il est donc essentiel de pouvoir prévoir le mouvement des nappes d'hydrocarbures très rapidement afin que des mesures appropriées de protection et d'atténuation des dommages soient prises.

Comme cela est expliqué en détail dans l'évaluation par Citizing des bénéfices socio-économiques du projet d'augmentation de puissance du supercalculateur CEPMMT (Citizing, 2017), le comportement des marées noires au contact de l'eau est variable et dépend dans une large mesure des conditions météorologiques. En effet, *le pétrole déversé dans l'eau, douce ou salée, ne se mélange pas avec elle. Il flotte en surface et se répand très vite, en une fine couche appelée « nappe de pétrole ». La surface de la nappe s'étend progressivement jusqu'à former une couche extrêmement mince. [...] Les nappes en surface sont soumises aux caprices des conditions météorologiques, des vagues et des courants.*<sup>82</sup> *Ces forces naturelles déplacent les nappes à la surface de l'eau. La température affecte également directement les caractéristiques physiques et chimiques du pétrole : elle peut très rapidement (d'un jour à l'autre) en modifier la viscosité et, en fin de compte, la composition, réduisant ou augmentant l'impact physique et biologique potentiel du pétrole. Tous ces facteurs sont susceptibles de faciliter ou d'empêcher la mise en place de barrages et les opérations de nettoyage. Les conditions météorologiques ont donc des effets importants non seulement sur les nappes de pétrole, mais aussi sur les performances des méthodes de nettoyage et des équipes qui s'y consacrent.*

Les marées noires peuvent avoir des conséquences environnementales dramatiques, causant la pollution et la contamination de zones naturelles (plages, côtes, océans), la destruction d'habitats, et la mort de poissons, oiseaux et mammifères marins (espèces potentiellement menacées d'extinction). Elles entraînent également la mort du plancton, premier maillon de la chaîne alimentaire (affecté par l'altération des caractéristiques de l'eau et par l'absence de luminosité au-dessous de la nappe), et donc celle des animaux qui s'en nourrissent<sup>83</sup>.

Comme nous l'avons vu plus haut dans la section traitant du transport maritime, Météo-France couvre plusieurs zones METAREAS (définies par l'OMM) pour lesquelles elle produit des prévisions qui alimentent ses services de météorologie marine et qui contribuent à la lutte contre les marées noires. En France, la lutte contre la pollution des mers est coordonnée par le préfet de la zone maritime concernée (Manche et mer du Nord, Atlantique ou Méditerranée), avec le soutien scientifique et technique de plusieurs organisations telles que le Cedre<sup>84</sup> (en charge de conseiller les autorités sur les décisions à prendre) et Météo-France (qui partage ses prévisions avec le Cedre). Météo-France peut aussi intervenir dans l'océan Indien, comme elle l'a fait en 2020 lorsque le navire japonais *Wakashio* s'est échoué au large des côtes de l'île Maurice, provoquant la fuite d'une quantité importante d'hydrocarbures. L'île ne disposant pas des ressources nécessaires pour le faire, la trajectoire de la marée noire a été calculée par Météo-France.

**Météo-France simule la dérive des nappes de polluants à la surface de la mer grâce à son modèle de dérive MOTHY.** MOTHY tient compte d'un grand nombre de données, en particulier des vents observés et des

<sup>81</sup> ITOPF, *Handbook 2011/12*, Londres, ITOPF, 2011.

<sup>82</sup> Voir <https://sciencing.com/oil-spill-affect-environment-4616883.html>.

<sup>83</sup> Voir <https://sciencing.com/remove-oil-sea-water-5649507.html>.

<sup>84</sup> Centre de documentation, de recherche et d'expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux.



prévisions de vents des modèles de Météo-France, mais aussi des analyses et prévisions des courants océaniques plus profonds fournies par le système de prévisions océanographiques de Mercator Océan et par le système d'océanographie opérationnelle pour la Méditerranée (*Mediterranean Forecasting System – MFS*), qui fait partie du programme Copernicus. Météo-France fournit également des observations et des prévisions météorologiques précieuses aux autorités chargées de la direction des interventions en mer. **Le système MOTHY est utilisé par Météo-France en moyenne une vingtaine de fois par semaine**, trois fois sur quatre pour le sauvetage de personnes ou la localisation d'objets flottants, et **une fois sur quatre pour la lutte contre les marées noires**, avec 25 % de ces demandes provenant des DOM/TOM. Météo-France a activé son modèle MOTHY environ 180 fois pour des déversements d'hydrocarbures en 2015, et 255 fois en 2020<sup>85</sup>. En plus de ces activations, l'échouement du *Wakashio* le 25 juillet 2020 au sud de l'île Maurice a provoqué 67 utilisations supplémentaires du modèle.

Les études existantes ne fournissent aucune donnée quantitative sur les performances des mesures d'intervention contre la pollution dans des conditions météorologiques variables. De plus, il est difficile de savoir quel organisme aurait remplacé Météo-France dans notre scénario contrefactuel et quelle aurait été la qualité du modèle de dérive fourni en comparaison avec MOTHY. La dimension internationale de l'activité ne facilite pas la définition d'un scénario contrefactuel. Nous savons toutefois que, dans les zones couvertes par Météo-France, ses modèles de prévisions atmosphériques sont fiables et précis, et son modèle MOTHY fournit des données de haute qualité. Ainsi, après le naufrage de l'Erika en 1999 (voir plus bas), MOTHY est apparu comme fournissant la prévision de dérive la plus précise, en comparaison avec les deux modèles commerciaux également mis en œuvre, OSIS (modèle britannique) et OILMAP (modèle américain). Nous ne savons pas avec certitude comment expliquer ces différences entre les modèles, mais la nature des données sur les courants et les vents et le mode de traitement des données sont considérés comme des causes probables par les météorologues<sup>86</sup>. Par ailleurs, Météo-France contribue également au service marin de Copernicus, auquel il transmet ses données sur les vagues. Par conséquent, s'il n'est pas pertinent de définir ici un scénario contrefactuel et de procéder à une analyse quantitative, nous pouvons raisonnablement avancer que **Météo-France permet d'apporter une contribution décisive à l'atténuation des conséquences environnementales des pollutions marines.**

---

<sup>85</sup> Source : <http://www.meteorologie.eu.org/mothy/statistiques/lancements.html>.

<sup>86</sup> *Marées noires et sols pollués par des hydrocarbures – Enjeux environnementaux et traitement des pollutions*. C. Bocard (2006). p. 108.

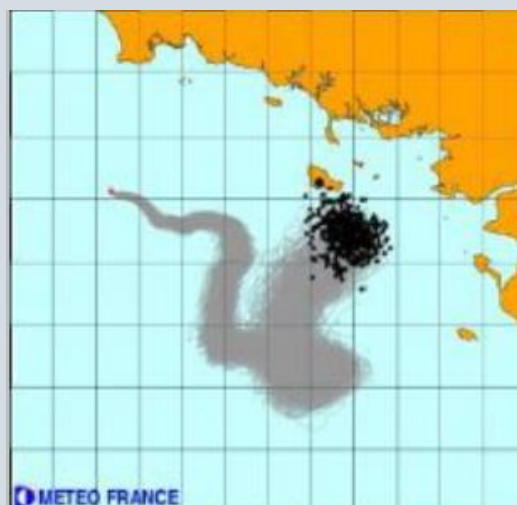
### Étude de cas d'une marée noire : le naufrage de l'Erika en 1999

L'Erika, pétrolier battant pavillon maltais construit en 1975 et affrété par Total, a coulé le 12 décembre 1999 au large des côtes bretonnes alors qu'il transportait 30 884 tonnes de fioul lourd de Dunkerque à Livourne.

11 200 tonnes sont restées emprisonnées dans les deux parties de l'épave et ont pu être récupérées par pompage, alors qu'environ 20 000 tonnes se sont déversées dans l'océan. Même si les prévisions météorologiques n'ont pas permis de récupérer tout le pétrole déversé, elles ont constitué, conjointement avec les prévisions de dérive, un appui important pour les autorités chargées d'organiser les opérations de nettoyage, en fournissant des informations et des prévisions cruciales sur la trajectoire de la nappe d'hydrocarbure. 1 200 tonnes ont finalement pu être récupérées, ce qui a permis de limiter les dommages environnementaux.

La figure ci-contre présente la simulation réalisée après le naufrage au moyen du modèle MOTHY, avec la prévision à 12 jours de la trajectoire de la nappe (en gris) et de l'emplacement des particules (en noir).

Figure 24 : Simulation de dérive de la nappe de pétrole de l'Erika au moyen du modèle MOTHY



Source : Météo-France

Sources : site web de Météo-France et Lucien Laubier (*La marée noire de l'Erika : conséquences écologiques et écotoxicologiques*, 2004)

Dans cette étude de cas, la quantité d'hydrocarbure récupérée semble assez faible relativement au volume total libéré dans l'océan. Toutefois, on notera que le naufrage de l'Erika a produit une pollution marine considérable avec des conséquences massives inévitables sur l'environnement. Fort heureusement, les accidents d'une telle ampleur sont exceptionnels. Météo-France applique son modèle MOTHY chaque semaine à des déversements d'hydrocarbures (représentant en moyenne 23 % de toutes les demandes reçues nécessitant l'utilisation de MOTHY<sup>87</sup>, le reste concernant le sauvetage ou d'autres opérations en mer) qui sont plus facilement contrôlables. **Les prévisions météorologiques contribuent à la mise en œuvre d'actions régulières qui ont un impact positif sur l'environnement. Comme nous l'avons vu plus haut, MOTHY a été activé à 255 reprises en 2020 en vue de soutenir l'action des autorités dans la lutte contre des déversements d'hydrocarbures. En 2019, 237 incidents de pollution marine ont été recensés dans des zones maritimes couvertes par Météo-France, dont 174 déversements d'hydrocarbures ayant conduit à environ 300 activations du modèle MOTHY<sup>88</sup>.**

**Les données satellitaires du programme Copernicus ont elles aussi été déterminantes pour la prévision de l'évolution des déversements d'hydrocarbures par les organisations météorologiques (comme expliqué plus haut), ainsi que pour la détection précoce de ces pollutions.** Des services développés en Europe utilisent des images RSO (radar à synthèse d'ouverture) pour aider les autorités à identifier les zones polluées par des hydrocarbures et à évaluer l'ampleur du problème le plus rapidement possible. Une fois l'alerte reçue, les autorités procèdent à une vérification sur site et mettent en œuvre les mesures appropriées si la pollution est confirmée. En France, 605 signalements de possibles pollutions ont été relayés aux CROSS (en charge de la surveillance des pollutions marines) en 2019, dont 48,7 %<sup>89</sup> provenaient de détections satellitaires du service

<sup>87</sup> Source : Météo-France.

<sup>88</sup> Source : Météo-France et le rapport *Surveillance des pollutions en mer. Bilan annuel 2019*, direction des affaires maritimes (ministère de la Mer).

<sup>89</sup> Les autres signalements provenaient de témoins à terre ou en mer, ou de moyens aéronautiques. Source : *Surveillance des pollutions en mer. Bilan annuel 2019* → <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Bilan%20annuel%20de%20surveillance%20des%20pollutions%202019.pdf>.

européen CleanSeaNet<sup>90</sup>. La détection précoce est essentielle pour éviter une propagation de grande ampleur des polluants, donc limiter les dommages environnementaux, en particulier ceux touchant la biodiversité. **Nous n'étudierons pas ici le rôle potentiel des activités d'observation de la Terre dans la surveillance des déversements d'hydrocarbures, mais il convient de garder en mémoire que ces observations sont essentielles pour la détection précoce des marées noires et l'élaboration des prévisions de météorologie marine.**

### C. Gestion des zones maritimes et autres zones aquatiques

#### i. *Rôle de l'observation de la Terre dans la surveillance des zones humides*

Il existe plusieurs types de zones humides, et elles sont présentes dans tous les pays et toutes les zones climatiques, des régions polaires aux tropiques et depuis les plus hautes montagnes jusqu'aux océans. Le terme « zones humides » regroupe des habitats différents, principalement aquatiques, qui partagent généralement certaines caractéristiques, telles que la présence d'une végétation spécifique (adaptée aux sols hydromorphes anoxiques). Les principaux types de zones humides sont classés en fonction de la végétation dominante ou de la source d'eau. Toutefois, ces milieux comptent parmi les écosystèmes les plus diversifiés sur le plan biologique et certains accueillent une très grande variété de types de plantes et sont alimentés par de multiples sources d'eau, ce qui rend leur classification difficile. Selon l'une des classifications possibles<sup>91</sup>, nous pouvons distinguer cinq principaux types de zones humides :

- tourbières : zones humides caractérisées par leur épaisse couche de sol gorgée d'eau et constituée de matières organiques mortes et en décomposition (font partie de cette catégorie les landes humides, les tourbières ouvertes ou couvertes de buissons, les forêts marécageuses sur tourbière, les zones humides de toundra, etc.), que l'on trouve partout dans le monde ;
- zones côtières et deltas : zones humides du littoral (mangrove, marais salés...), situées au carrefour de trois écosystèmes : mer, eau douce et terre. Nous aborderons plus précisément ce sujet dans la section suivante, qui traite du rôle de l'observation de la Terre dans la surveillance des zones côtières ;
- cours d'eau et lacs : écoulement naturel d'eau, généralement douce, vers un océan, un lac, une mer ou un autre cours d'eau ;
- zones humides de haute altitude : lacs glaciaires, marais, prairies humides, tourbières et cours d'eau situés en haute altitude ;
- zones humides arctiques : tourbières, cours d'eau, lacs et baies peu profondes, couvrant près de 60 % de la superficie totale de l'Arctique.

**Les zones humides font partie des écosystèmes les plus productifs de la planète, abritant une part importante de la biodiversité en Europe ; ces réserves d'eau douce permettent à de nombreuses espèces d'oiseaux et de mammifères de s'alimenter et de se reproduire, et elles constituent des habitats essentiels pour les poissons et les amphibiens. En outre, elles jouent un rôle particulièrement important dans la séquestration du carbone.** Prenons l'exemple des tourbières, avec leur sol gorgé d'eau et constitué de matières organiques partiellement décomposées. Comme la décomposition normale ne peut avoir lieu, le carbone de l'atmosphère s'y trouve piégé. La quantité de carbone ainsi emprisonnée est évaluée à plus de 600 gigatonnes à l'échelle mondiale<sup>92</sup> (ce qui représente jusqu'à 44 % de la quantité totale de carbone du sol

<sup>90</sup> Proposé par l'AESM (Agence européenne pour la sécurité maritime), ce service paneuropéen de détection par satellite des nappes d'hydrocarbures et des navires traite les images des satellites RSO, tels que Sentinel-1A et Sentinel-1B de Copernicus, pour repérer et suivre les nappes d'hydrocarbures à la surface des océans et pour surveiller les pollutions accidentelles dans les situations d'urgence.

<sup>91</sup> Classification établie par l'organisation mondiale à but non lucratif Wetlands International, qui se consacre à la conservation et à la restauration des zones humides → <https://www.wetlands.org/wetlands/types-of-wetlands-2/>.

<sup>92</sup> Source : UICN → [https://www.iucn.org/sites/default/files/2022-04/iucn\\_issues\\_brief\\_peatlands\\_and\\_climate\\_change\\_final\\_nov21.pdf](https://www.iucn.org/sites/default/files/2022-04/iucn_issues_brief_peatlands_and_climate_change_final_nov21.pdf).

et deux fois plus que la quantité de carbone stockée par les forêts<sup>93</sup>). **Les zones humides rendent également de nombreux autres services écosystémiques, tels que l’approvisionnement en eau, la purification de l’eau et la protection contre les inondations.**

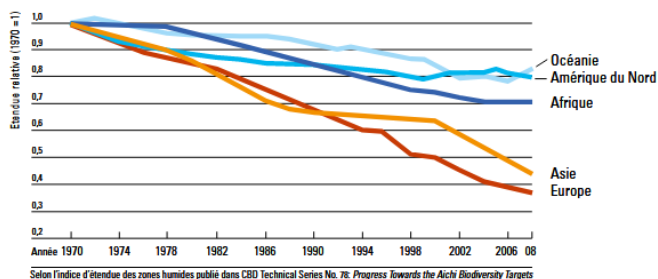
Les zones humides ont été confrontées à des menaces diverses au fil du temps, qui ont entraîné des pertes de superficie considérables, illustrées dans le graphique ci-contre. **Les scientifiques estiment que 64 % des zones humides de la planète ont disparu entre 1900 and 2010<sup>94</sup>** et qu’elles ne représentent que 5 à 7 % de la surface terrestre aujourd’hui.

Les principales causes de ce déclin sont la pression croissante de l’agriculture intensive, le détournement des cours d’eau par les barrages, digues et canalisations, et le développement des infrastructures.

En 2011, la Commission européenne a publié les résultats d’une évaluation de l’état de conservation des zones humides dans les États membres de l’UE, montrant que seulement 10 % de la superficie totale des écosystèmes de zones humides présentaient un état de conservation des habitats favorable, alors que 45 % souffraient d’un « mauvais » état de conservation<sup>95</sup>.

De nombreux pays dans le monde ont pris conscience de l’importance des zones humides et sont de plus en plus impliqués dans leur protection. **Les mesures mises en œuvre sont variées et complémentaires : élaboration de politiques tenant compte des services écosystémiques fournis par les zones humides et les intégrant dans la planification de l’utilisation des sols ; utilisation judicieuse de l’ensemble des sites restants (en visant à apporter une réponse aux besoins humains tout en préservant la biodiversité et les autres services rendus par les zones humides) ; restauration des zones humides dégradées ; recherche de sources de financement pour la conservation de ces écosystèmes ; sensibilisation aux bénéfices apportés par ces milieux ; etc.** Parmi les politiques et les programmes adoptés, citons la Convention relative aux zones humides d’importance internationale, signée en 1971 à Ramsar (Iran), aussi dénommée « Convention de Ramsar ». Premier accord international spécifiquement consacré à la protection et à l’utilisation durable des zones humides, la Convention de Ramsar regroupe 172 pays. **Sa principale réalisation est la constitution de la « Liste de Ramsar » qui recense les zones humides : les sites Ramsar inscrits sur cette liste représentent actuellement une superficie totale de 254 685 425 ha dans le monde entier et doivent être protégés et surveillés par les pays dans lesquels ils se trouvent.** En particulier, ces sites doivent satisfaire un ensemble de critères, tels que la présence de poissons rares ou menacés et la présence d’oiseaux d’eau. **La Convention de Ramsar est un instrument international, mais au niveau de l’UE, les principales législations garantissant la protection des zones humides européennes sont les directives « Habitats » et « Oiseaux »** (décrites dans la section « Gestion des espaces forestiers, agricoles et montagnards et de leurs écosystèmes » du présent rapport) **et la directive-cadre sur l’eau (DCE).** Le réseau de sites protégés Natura 2000 de l’UE, ainsi que l’intégration des zones humides dans les plans de gestion de district hydrographique au titre de la DCE, jouent un rôle majeur pour aider à garantir la conservation future et l’utilisation durable des zones humides. Bien que

Figure 25 : Évolution de l’indice d’étendue des zones humides (*Wetlands Extent Index*) dans les différentes régions du monde



Source : <https://www.ramsar.org>

Note : cet indice est un indicateur du déclin mesuré sur un échantillon de plus de 1 000 zones humides depuis 1970

<sup>93</sup> Source : <https://theconversation.com/peatlands-keep-a-lot-of-carbon-out-of-earths-atmosphere-but-that-could-end-with-warming-and-development-151364>.

<sup>94</sup> Selon la Convention de Ramsar.

<sup>95</sup> Source : AEE → <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/conservation-status-of-habitat-types-4>.

le réseau Natura 2000 ne soit pas spécifiquement dédié aux zones humides, ses objectifs sont les mêmes que ceux de la Convention de Ramsar.

**L'utilisation des données d'observation de la Terre en appui à la gestion et à la conservation des zones humides est envisagée de plus en plus concrètement.** Combinées aux données *in situ*, ces observations pourraient fournir aux autorités environnementales des informations clés actuellement difficiles à recueillir compte tenu de la complexité, de la taille et de la difficulté d'accès de certains écosystèmes de zones humides, notamment concernant :

- la superficie d'une zone humide et l'évolution qu'elle a connue dans le temps, grâce à une cartographie précise (délimitation) (constitue aussi un bon indicateur de l'impact du changement climatique sur ces zones) ;
- les pressions extérieures qui menacent un tel écosystème, par exemple grâce à la détection des changements dans l'utilisation des sols environnants (urbanisation, extension des zones agricoles, aquaculture) ou les conditions hydrologiques (drainage, etc.) ;
- les signes de détérioration de l'écosystème et de la qualité de l'eau (eutrophisation, importantes charges sédimentaires, etc.), évalués à partir d'indicateurs tels que l'indice d'humidité des sols, la couverture végétale, la teneur en chlorophylle, etc. ;
- la mesure dans laquelle l'utilisation des eaux en amont affecte l'écosystème.

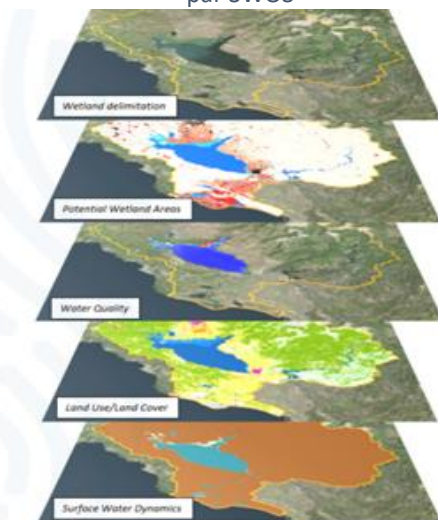
**Toutes ces informations sont essentielles pour la mise en œuvre de mesures appropriées permettant de protéger ou de restaurer les zones humides, et de garantir ainsi la continuité des services écosystémiques qu'elles fournissent. En particulier, les données satellitaires en accès libre et gratuit des missions Sentinel, dans le cadre du programme Copernicus, ont été et resteront un outil puissant pour aider les autorités compétentes à assurer la surveillance des zones humides à grande échelle avec des coûts maîtrisés, et à garantir le respect de la Convention de Ramsar (ainsi que des directives de l'UE, en ce qui concerne les États membres). Si le programme américain Landsat fournit des données et des observations de haute qualité sur une longue période (plusieurs décennies), les missions Sentinel ont apporté des améliorations considérables en matière de résolution spatiale (de 60 à 10 m pour Sentinel-2 selon la bande) et de capacité de revisite d'une même zone (répétitivité) (environ 5 jours pour Sentinel-2).** La fusion des données des programmes américain et européen offre un degré élevé de précision pour la surveillance et la cartographie des zones humides. Bien que les possibilités de télédétection puissent s'avérer limitées dans le cas des zones humides ayant une végétation abondante (notamment les mangroves, dont les arbres peuvent faire obstacle à l'observation du bassin hydrographique depuis l'espace), **les études ont montré que les données satellitaires étaient une source fiable pour la surveillance de ces écosystèmes en complément des inspections *in situ*, des algorithmes et d'autres sources de données (photos aériennes, etc.).** Ludwig *et al.* (2019) ont ainsi testé un algorithme utilisant les capacités d'imagerie de l'instrument MSI (MultiSpectral Instrument) des satellites Sentinel-2 pour détecter l'eau et l'humidité sur trois sites d'étude correspondant à différents types de zones humides, au Kenya et en Ouganda, en Algérie, et en Autriche. Ils ont estimé la précision globale à plus de 92 % (plus de 96 % pour la détection de l'eau et plus de 75 % pour la détection de l'humidité). Mahdianpari *et al.* (2018) ont montré que les données des missions Sentinel du programme Copernicus pouvaient être utilisées pour réaliser une cartographie d'inventaire des zones humides. Leur étude a porté sur cinq zones humides situées au Canada, à l'intérieur d'un territoire de 106 000 km<sup>2</sup>, et a été réalisée à partir des données RSO (radar à synthèse d'ouverture) des Sentinel-1 ainsi que des données optiques des Sentinel-2. La classification résultant des images optiques Sentinel-2 était plus précise que celle résultant des images radar Sentinel-1, mais leur utilisation conjointe a permis d'améliorer considérablement la précision (plus de 70 % de précision dans l'identification des zones humides). L'intérêt des données fournies par Sentinel-2 pour la cartographie et la surveillance des zones humides a également été démontré par Kaplan et Avdan (2017) dans le cadre d'une étude réalisée en Turquie à partir de données Sentinel-2, visant à identifier les contours des zones humides et à utiliser l'indice de végétation par différence normalisé (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) et

l'indice d'eau par différence normalisé (*Normalized Difference Water Index*, NDWI<sup>96</sup>) pour classer les différentes composantes des zones ainsi délimitées. La précision des résultats obtenus, évaluée à un coefficient Kappa de 0,95<sup>97</sup>, a permis de conclure que la méthode était adaptée pour la cartographie et la surveillance des zones humides.

Compte tenu du potentiel du programme Copernicus pour la surveillance des zones humides, l'Union européenne et l'ESA, conjointement avec d'autres partenaires, ont lancé deux grands projets s'appuyant sur les données fournies par ce programme et d'autres données satellitaires afin de développer des services opérationnels destinés à aider les pays dans leurs décisions concernant les activités locales de conservation :

- **le projet Satellite-based Wetland Observation Service (SWOS)**, financé par l'Union européenne et développé entre 2015 et 2018 par six organisations d'utilisateurs/ONG, trois universités et quatre entreprises, **visait à fournir un service d'information et de surveillance dédié aux zones humides, simple d'utilisation**, avec des cartes et des indicateurs, une boîte à outils logicielle et un portail communautaire. Un total de neuf indicateurs, tels que l'utilisation des sols, la couverture des sols, la qualité de l'eau et la température de surface, ont été élaborés avec des cartes permettant de suivre leurs variations dans le temps et dans l'espace. En tenant compte des caractéristiques écologiques et hydrologiques d'une zone humide, SWOS offre une évaluation intégrée de l'écosystème et des dangers qui le menacent. Le projet a permis d'obtenir une vue d'ensemble de l'état des zones humides dans plus de dix pays et d'offrir des services concernant cinquante sites de zones humides en Europe, en Afrique et au Moyen-Orient (sites tests), sur la base des données fournies par les Sentinel-1, -2 et -3, Landsat, MERIS et d'autres missions ;
- **le projet GlobWetland Africa (GW-A)**<sup>98</sup>, financé par l'ESA en partenariat avec l'équipe Afrique du secrétariat de la Convention de Ramsar entre 2015 et 2018, **avait pour objectif de faciliter l'exploitation des données satellitaires pour la conservation, l'utilisation rationnelle et la gestion efficace des zones humides en Afrique, et d'aider les parties contractantes africaines de la Convention de Ramsar à mieux remplir leurs engagements et obligations**. GW-A a fourni aux utilisateurs les méthodes et outils dont ils avaient besoin pour exploiter au mieux les observations satellitaires de Copernicus dans le cadre de l'inventaire, de l'évaluation et de la surveillance des zones humides. En particulier, les données Sentinel-1 et Sentinel-2 ont permis de cartographier l'étendue et la fréquence de la présence de l'eau et des sols humides, informations servant de base à la préparation des inventaires nationaux de ces écosystèmes. Les données de Sentinel-3 ont permis de mesurer des indicateurs hydrographiques et d'estimer certains indicateurs de qualité de l'eau. Toutefois, la mesure de la qualité de l'eau restait limitée à sa clarté, sa turbidité, sa couleur et ses concentrations en constituants optiquement actifs (tels que les pigments d'algues ou

Figure 26 : Exemples d'indicateurs fournis par SWOS



**Légende :**

- Wetland delimitation = Délimitation des zones humides
- Potential Wetland Areas = Zones humides potentielles
- Water Quality = Qualité de l'eau
- Land Use/Land Cover = Couverture et utilisation des sols
- Surface Water Dynamics = Dynamiques des eaux de surface

Source : <https://medwet.org/wp-content/uploads/2018/10/swos-en.pdf>

<sup>96</sup> NDWI est un indice mesuré par télédétection qui permet d'évaluer la teneur en eau des feuilles du couvert végétal.

<sup>97</sup> Les coefficients Kappa vont de -1 à +1. Plus la valeur du coefficient Kappa est élevée, plus le degré de concordance est important. Si elle est égale à 1, la concordance est parfaite. Si elle est égale à 0, la concordance est identique au résultat qui pourrait être obtenu du seul fait du hasard. Ici, le coefficient de 0,95 signifie que la cartographie correspond presque parfaitement à la réalité.

<sup>98</sup> Pour en savoir plus sur ce projet :

[https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/strp20\\_agenda\\_item5\\_globwetland\\_africa\\_mpaganini.pdf](https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/strp20_agenda_item5_globwetland_africa_mpaganini.pdf).

les solides en suspension), des inspections *in situ* restant nécessaires pour préciser ces caractéristiques. La mission CryoSat de l'ESA a également été mise à contribution pour l'hydrographie.

**Les résultats de ces deux projets ont été très vite mis à la disposition du public et ont probablement contribué à renforcer la qualité de la surveillance des zones humides et des mesures de protection et de restauration de ces écosystèmes.** Par exemple, en Grèce, la mise en application de l'approche du projet SWOS pour cartographier les écosystèmes de zones humides a permis aux autorités locales de comprendre les changements dans l'étendue de ces zones résultant de leur conversion en terres agricoles. En Tanzanie, les tendances en matière d'utilisation des sols ont aidé les responsables de la gestion des zones humides à élaborer des stratégies qui soutiennent le développement économique et la durabilité des ressources naturelles<sup>99</sup>.

**Les données du programme Copernicus sont également utilisées par d'autres services opérationnels en Europe pour aider à la surveillance et à la restauration des zones humides.** Yorkshire Peat Partnership (organisation britannique financée par le ministère de l'environnement, de l'alimentation et des affaires rurales et par de nombreux autres contributeurs) a ainsi développé un service utilisant les données de télédétection des programmes Landsat et Copernicus pour aider les autorités chargées de la protection de l'environnement et autres autorités compétentes à mener à bien la restauration des tourbières dans une région du Royaume-Uni<sup>100</sup>. Des cartes indiquant l'ampleur du gonflement des tourbières (caractéristique des tourbières ayant été restaurées avec succès) sont créées à partir de l'observation de la productivité et du niveau d'humidité de la végétation, grâce au calcul des indices de végétation. Par ailleurs, des cartes faisant apparaître les étendues de tourbe nue et les surfaces de cicatrices de brûlure sont générées à partir de techniques de classification d'images (telles que le maximum de vraisemblance et la machine à vecteurs de support). Ces classifications utilisent à la fois les données Sentinel-1 et Sentinel-2, et aident à quantifier l'étendue des dommages sur les sites des tourbières.

**Outre les services développés à l'initiative de l'Union européenne, les données satellitaires en accès libre et gratuit du programme Copernicus ont permis aux entreprises privées et aux agences locales et nationales, à l'intérieur comme à l'extérieur des frontières de l'Union, de développer des activités économiques visant à soutenir les autorités dans leurs opérations de surveillance et de préservation des zones humides. Cela a permis d'améliorer la gestion de ces écosystèmes, et a ainsi produit divers effets positifs sur l'environnement, notamment en matière de protection de la biodiversité et de réduction des émissions de GES. Cependant, les zones humides restent fortement menacées par les activités humaines. De nouvelles mesures de protection et de restauration devront être mises en œuvre, auxquelles l'observation de la Terre devrait apporter des informations d'un très grand intérêt.**

## *ii. Rôle de l'observation de la Terre dans la surveillance des zones côtières*

Le terme « zone côtière » désigne, selon la définition de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), « la frange de terre affectée par sa proximité avec la mer et la frange de mer affectée par sa proximité avec la terre, dont l'étendue en tant que siège d'activités humaines a une influence notable sur la chimie de l'eau et l'écologie marine<sup>101</sup> ». Les zones côtières représentent un enjeu majeur pour l'Union européenne, qui compte environ 68 000 km de littoral<sup>102</sup> (plus de trois fois le linéaire côtier des États-Unis), la superficie totale des zones côtières de tous les pays membres de l'AEE étant d'environ 560 000 km<sup>2</sup>. Selon l'AEE<sup>103</sup>, près de la moitié

<sup>99</sup> Source : <https://cordis.europa.eu/article/id/254156-observing-wetlands-from-above/fr>.

<sup>100</sup> Source : « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). CE. p. 82.

<sup>101</sup> Source : <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/coastal-area>.

<sup>102</sup> Soit 185 000 km de littoral européen si l'on inclut la Turquie, l'Islande et la Norvège.

<sup>103</sup> Source : <https://www.eea.europa.eu/themes/water/europes-seas-and-coasts>.

de la population de l'Union vit à moins de 50 km d'un littoral maritime. En 2011, 206 millions de personnes, soit 41 % de la population de l'UE, vivaient dans des régions côtières d'Europe (données 2011 d'Eurostat).

Les écosystèmes marins et côtiers d'Europe sont très variés : grands fonds marins et eaux côtières, mais aussi terres côtières telles que les plages, forêts, zones humides (les mangroves, par exemple), marais salés, prairies sous-marines, laisses de vase, etc. Ces environnements accueillent une part importante de la population humaine et hébergent une riche biodiversité avec de nombreuses espèces de poissons et d'oiseaux, d'insectes, de mammifères, de récifs coralliens, d'arbres, d'algues et autres plantes et animaux. En outre, les écosystèmes côtiers rendent d'importants services à l'économie (services alimentaires avec la pêche, services culturels avec le tourisme, etc.) et à l'environnement (services de soutien et de régulation, par exemple de défense contre les aléas naturels, photosynthèse, régulation du climat, etc.). Cependant, **les écosystèmes côtiers sont de plus en plus menacés par les activités humaines et le changement climatique, ce qui engendre divers problèmes environnementaux, tels que la perte de biodiversité, l'élévation du niveau des mers ou l'érosion côtière.**

#### *Surveillance des écosystèmes pour prévenir la perte de biodiversité*

La biodiversité est menacée par de nombreuses perturbations, telles que l'augmentation de la population humaine, la pêche, l'agriculture intensive, la pollution chimique industrielle, le développement touristique, la navigation, les infrastructures énergétiques, les autres activités maritimes, etc. Les inspections *in situ* ont un rôle essentiel dans la détection des pressions qui s'exercent sur la biodiversité ; elles permettent notamment de procéder à des mesures chimiques de l'eau, ce qui ne peut être réalisé à partir d'images satellites. Néanmoins, utilisée en appui des inspections *in situ*, la télédétection a prouvé son efficacité dans la détection précoce des changements intervenant dans les modèles récurrents et des altérations affectant les écosystèmes au sein des zones humides côtières, ce qui peut permettre de prévenir une perte irréversible de biodiversité et aider à identifier les zones problématiques. Les missions Sentinel du programme Copernicus fournissent désormais des informations essentielles pour permettre aux responsables politiques de visualiser et de comprendre les tendances. Leurs données permettent par exemple de repérer les zones où les moules et les coques sont présentes en abondance, ou de détecter les algues dont se nourrissent certaines espèces (oiseaux, par exemple)<sup>104</sup>. Ce type d'informations peut être utilisé pour appuyer ou valider des travaux de modélisation visant à prévoir les tendances et la dynamique des populations d'oiseaux avec une résolution plus élevée (à la fois dans l'espace et dans le temps) que les études classiques sur le terrain. **Ces modèles aident *in fine* à quantifier les services rendus par les écosystèmes, à fournir des informations sur la diminution de la population de certaines espèces, notamment d'oiseaux, et à optimiser les stratégies de gestion en matière de conservation de la biodiversité dans les zones humides côtières.**

De plus, **le service marin de Copernicus fournit des observations utiles au suivi de la biodiversité marine**, susceptibles d'aider les responsables politiques à mieux comprendre cette biodiversité et à adopter des stratégies mondiales fondées sur les données. Il n'est pas possible de détecter et de répertorier les espèces depuis l'espace, mais les satellites Sentinel du programme Copernicus (principalement Sentinel-3) fournissent de bons indicateurs de la santé du milieu marin (comme la dispersion de la chlorophylle a et du micronecton), qui peuvent être appliqués au suivi des espèces menacées d'extinction<sup>105</sup>. Ces variables représentent la base de la chaîne alimentaire marine et nous éclairent sur le comportement animal, notamment sur les trajets des proies. Les images satellites permettent également d'observer des données physiques telles que la température, la salinité ou les courants marins, qui offrent une vision plus large du milieu marin et des conditions d'habitat favorables aux différentes espèces, mais ces informations doivent être combinées avec des données *in situ*, essentielles pour mesurer les paramètres biochimiques (par exemple l'acidité). **Les données océanographiques satellitaires peuvent donc être exploitées pour compléter les données *in situ* et pour intégrer une approche axée sur les écosystèmes aux politiques liées à la protection de l'environnement**

<sup>104</sup> Source : <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/-/copernicus-sentinels-improve-monitoring-of-coastal-ecosystems>.

<sup>105</sup> Source : <https://marine.copernicus.eu/services/public-policies/protecting-biodiversity>.



et de la biodiversité, notamment, pour l'UE, la directive-cadre « stratégie pour le milieu marin », la stratégie biodiversité et la directive « Habitats ».

*Surveillance de l'érosion côtière pour une meilleure adaptation au changement climatique*

**Les activités humaines et le changement climatique ont contribué à l'accélération de l'érosion côtière.**

L'érosion côtière est la perte ou le déplacement de terres, ou la perte à long terme de sédiments et de roches le long du littoral, sous l'action des vagues, des courants, des marées, de l'eau poussée par le vent, des glaces flottantes ou d'autres effets des tempêtes.

Figure 27 : Érosion d'une plage à New York, 2012



Source : Haddow et al. (2020) – photographie prise par Andrea Booher, FEMA

**L'érosion est à l'origine de la destruction d'habitats pour la faune et de certains écosystèmes côtiers (dunes, mangroves, etc.) qui fournissent une défense naturelle contre plusieurs aléas (notamment les tsunamis et les ondes de tempête), rendant ces zones encore plus vulnérables à ces aléas (Haddow et al., 2020).** L'érosion du littoral n'est pas un fait nouveau, mais son accélération du fait du changement climatique, ainsi que la construction de bâtiments et de routes à proximité des côtes, augmentent les risques d'inondation et d'effondrement de bâtiments. **La surveillance des environnements littoraux et le suivi de leur érosion au fil du temps sont donc essentiels pour fournir aux responsables politiques et autres décideurs, tant au niveau local que régional et national, les informations dont ils ont besoin pour mettre en œuvre des mesures d'adaptation au changement climatique optimales.** Selon le GIEC, l'élévation du niveau des mers causée par le changement climatique va aggraver l'érosion côtière dans le monde entier et modifier considérablement le tracé des côtes<sup>106</sup>. Cette élévation ne pouvant pas être empêchée, mais seulement limitée, les pouvoirs publics devront adapter leurs territoires pour faire face aux conséquences de l'érosion.

**Les missions Sentinel du programme Copernicus se sont révélées utiles pour suivre l'évolution des traits de côte et leur érosion au fil du temps.** En particulier, elles fournissent des vues répétitives et cohérentes des zones côtières qui viennent compléter d'autres données (cartes des côtes, levés topographiques des plages, photographies aériennes, etc.) et améliorent le suivi des zones difficiles d'accès ou de grande étendue. Les images RSO (radar à synthèse d'ouverture) des Sentinel-1 ont été utilisées pour reproduire des traits de côte et mettre en évidence des tendances d'érosion. Par exemple, des chercheurs de Deltares (institut néerlandais indépendant) ont développé une méthode automatique d'extraction du trait de côte pour la plage de Torre Canne dans les Pouilles (Italie du Sud), basée sur la séparation terre-eau et utilisant les données Sentinel-1. Le résultat de l'extraction a été comparé aux traits de côte générés par des systèmes d'imagerie vidéo. Le résultat reproduisait fidèlement le trait de côte, en tenant compte de la limitation de résolution des informations satellitaires. La surveillance locale a montré que cette plage subissait une érosion depuis plusieurs décennies. **Ce résultat démontre le potentiel des données Sentinel-1 pour aider à la surveillance de plages comparables ne bénéficiant pas de systèmes d'imagerie vidéo, avec l'objectif d'identifier les changements et de**

<sup>106</sup> Wong P.P. et al. (2014). « Chapter 5: Coastal Systems and Low-Lying Areas ». Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC AR5 WG2), Partie A, 2014. p. 361–409.

transmettre l'information aux responsables politiques. Les images optiques des Sentinel-2 ont également démontré leur fiabilité dans la détection des tendances d'érosion. Gomes da Silva *et al.* (2020) ont combiné des images Sentinel-2 et Landsat (Landsat-5 et Landsat-8) pour analyser l'évolution du trait de côte dans le delta de Tordera (Espagne) sur une période longue (entre 1994 et 2018). Cette analyse leur a permis de chiffrer la tendance moyenne à l'érosion, mesurée à l'aide des données satellitaires, à -4,79 mètres par an, soit un résultat similaire au chiffre de -4,68 mètres par an obtenu dans le cadre d'une étude antérieure menée à partir de photographies aériennes à haute résolution, dans la même région, entre 1995 et 2009. Cela a démontré que les images satellites fournissent des résultats fiables pour le suivi de l'évolution des traits de côte. Bien que les données Sentinel-2 semblent fournir des résultats un peu plus précis que les images Landsat 8 pour la cartographie de l'évolution du trait de côte, du fait de sa plus grande résolution (observation confirmée par exemple par Mitri *et al.* (2020)), l'utilisation combinée des deux sources d'images devrait produire des observations à long terme fiables pour la surveillance continue des changements affectant les traits de côte.

Figure 28 : Produits du projet Coastal Erosion Project pour une côte anglaise



Étant donné le potentiel du programme Copernicus pour une telle application, l'ESA, en collaboration avec le consortium international Coastal Change from Space, a lancé en 2019 le projet Coastal Erosion Project, dirigé par ARGANS (société spécialisée dans l'observation de la Terre par satellite, implantée au Royaume-Uni et en France), en partenariat avec adwäisEO (Luxembourg) et isardSAT (Espagne)<sup>107</sup>. Ce projet visait à développer des services de surveillance de l'érosion destinés à fournir des informations clés pour aider à mieux cibler les investissements publics et les actions correctives dans le cadre d'une stratégie d'adaptation au

changement climatique. Le projet a montré comment exploiter 25 années de données historiques sur les traits de côte à partir d'images RSO et d'images dans le visible et le proche infrarouge, en utilisant les données Sentinel-1 et -2 ainsi que le catalogue de données Landsat et ERS/Envisat de l'ESA. De telles applications sont d'une importance capitale pour aider les pays concernés par l'analyse à atténuer les effets socio-économiques négatifs de l'érosion côtière. Le développement du service et de ses produits s'est terminé en 2021 et ceux-ci vont bientôt devenir opérationnels et servir d'appui aux autorités compétentes pour les années à venir. Le projet analyse 2 800 km de linéaire côtier dans quatre pays et s'appuie sur 25 années d'imagerie satellitaire.

D'autres services permettant de surveiller l'évolution des côtes en Europe à partir des données du programme Copernicus ont été développés, et leurs premières utilisations opérationnelles sont prometteuses. L'étude de cas suivante en présente un exemple concret.

<sup>107</sup> Pour en savoir plus sur le projet : <https://coastalerosion.argans.co.uk/doc.html>.

## Étude de cas : l'imagerie satellitaire au service de l'amélioration de la gestion des côtes en région Nouvelle-Aquitaine (France)<sup>108</sup>

Du fait de l'état de la surface de la mer, et notamment du déferlement des vagues, les observations de terrain sont difficiles et non sans danger en Nouvelle-Aquitaine. À l'inverse, les observations fréquentes et synoptiques acquises au moyen de l'imagerie satellitaire optique multispectrale facilitent la surveillance des tendances d'érosion et, *in fine*, l'adaptation des stratégies d'observation et de gestion des côtes, tant pour les scientifiques que pour les utilisateurs finaux.

Grâce aux outils de traitement de la couleur et des images de l'océan combinés à l'intelligence artificielle et à l'apprentissage automatique, le capteur optique Sentinel-2 du programme Copernicus permet de calculer avec précision des paramètres physiques et biogéochimiques tels que la température de l'eau, la salinité, la concentration en chlorophylle, la topographie, etc. La détection des morphologies côtières et l'analyse de leur évolution peuvent atteindre un niveau élevé de précision, que l'on retrouvera dans l'évaluation des tendances d'érosion telles que l'évolution du trait de côte, avec pour seule limite la résolution des capteurs spatiaux. La photo ci-dessus illustre le résultat d'une analyse de ce type réalisée dans la région ; le trait de côte est représenté par une ligne de couleur qui met en évidence les changements qui l'affectent et la progression rapide de l'érosion : trait vert en 2013, rouge en 2014, bleu en 2015. Des indicateurs côtiers mesurés par télédétection, par exemple des cartes bathymétriques établies à partir des données Sentinel-2, devraient pouvoir être exploités très prochainement par l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine afin d'en déduire plus précisément les tendances d'érosion dans la région. Ces informations seront essentielles pour identifier les phénomènes locaux et à court terme et les tendances à long terme, ce qui aidera à prévoir l'impact des futurs aléas côtiers. Sur cette base, des recommandations pourront être faites pour améliorer la gestion du littoral et les stratégies locales visant à mettre en œuvre des mesures d'atténuation des risques liés au changement climatique, telles que la préservation des écosystèmes (plages, mangroves...) ayant un rôle déterminant dans la réduction des conséquences des aléas naturels.

Figure 29 : Détection et analyse de l'évolution du trait de côte (de 2013 à 2015) sur une plage française



Source : « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018)

En outre, les missions Sentinel de prochaine génération, telles que Sentinel-6, permettront de mieux observer les océans et de disposer de produits plus performants, ce qui devrait renforcer la bonne surveillance des zones côtières.

<sup>108</sup> Source : « The ever-growing use of Copernicus across Europe's regions » (2018). CE. p. 79.

## 4. Zones urbaines

### A. Canicules et îlots de chaleur urbains

Selon les projections de Météo-France, le changement climatique entraînera des phénomènes extrêmes à l'horizon 2100, qui se manifesteront, à Paris, de la façon suivante :

- 10 à 45 jours très chauds par an (>30 °C), contre 10 jours en moyenne aujourd'hui ;
- 1 à 12 jour(s) extrêmement chauds par an (>35 °C), contre 1 jour aujourd'hui ;
- 3 à 26 jours de canicule par an, contre 1 jour en moyenne aujourd'hui<sup>109</sup>.

Nous avons déjà constaté, année après année, une multiplication des épisodes caniculaires et une augmentation des records de température. En 2019, Paris a été marquée par un épisode de canicule d'une intensité exceptionnelle, avec un record à 42,6 °C à la station du parc Montsouris. La chaleur extrême est plus intense dans les zones urbaines que dans les zones rurales, en particulier la nuit. Ce phénomène, bien connu sous le nom d'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU), affecte le confort de vie des citoyens pendant les canicules. À la campagne, grâce au phénomène d'évapotranspiration, les plantes et les sols ne retiennent pas l'énergie solaire reçue pendant la journée. En revanche, dans les villes, l'énergie solaire est emmagasinée dans les matériaux des bâtiments et dans d'autres surfaces imperméables, comme les routes et les trottoirs. La température des bâtiments et des chaussées augmente, car ceux-ci emmagasinent de l'énergie qui ne peut se dissiper. La nuit, les surfaces imperméables restituent dans l'atmosphère urbaine l'énergie accumulée au cours de la journée. Ainsi, l'air se refroidit moins rapidement en ville qu'à la campagne. À Paris, l'ICU se traduit par une différence de température de l'ordre de 2,5 °C avec les zones rurales alentour.

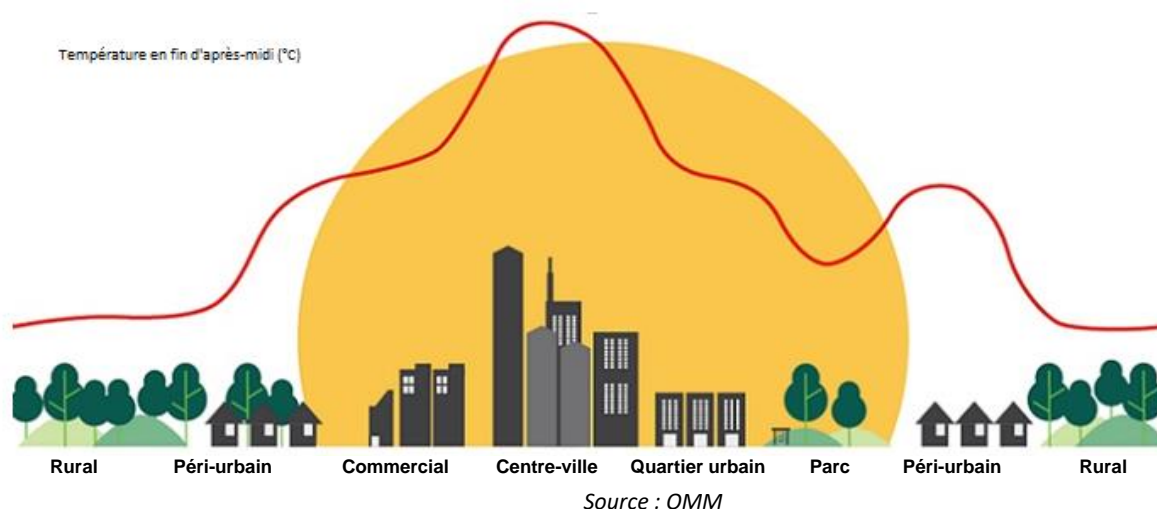
L'ICU est largement dépendant des conditions climatiques. Ainsi, lors de la canicule de 2003, on a pu observer une variation des températures de près de 8 °C entre le cœur de Paris et le reste de l'agglomération<sup>110</sup>. Avec le changement climatique, les ICU sont appelés à se multiplier. Pour y faire face, les décideurs locaux devront adapter leurs politiques de conception et de planification urbaines.

Certaines solutions permettent de réduire la température nocturne tandis que d'autres visent à faire bénéficier les citoyens d'îlots de fraîcheur pendant la journée. La solution la plus courante consiste à végétaliser les espaces publics et les bâtiments car, grâce à l'évapotranspiration, les plantes peuvent humidifier et rafraîchir l'air.

<sup>109</sup> Source : Le changement climatique à Paris, Évolution du climat à Paris depuis 1900, quel climat futur ?, Agence parisienne du climat, juillet 2015.

<sup>110</sup> Source : Ville de Paris. <https://cdn.paris.fr/paris/2021/05/12/92b8f55c368b25f126cd870d2343210b.pdf>.

Figure 30 : Représentation visuelle d'un îlot de chaleur urbain



Une connaissance approfondie des changements climatiques passés et l'étude des évolutions potentielles du climat constituent un point de départ essentiel à la mise en œuvre de mesures d'atténuation et d'adaptation. À cet égard, Météo-France joue un rôle majeur dans la connaissance du climat et de son évolution. Ses chercheurs contribuent notamment au rapport du GIEC (voir ci-après la section consacrée à la recherche) qui rend compte des connaissances scientifiques relatives au changement climatique et élabore des scénarios pour le futur. **Météo-France établit également ses propres projections climatiques pour la France afin d'aider les décideurs à comprendre l'évolution des aléas naturels et à prendre des mesures adaptées à l'échelle régionale.** Ces prévisions sont la première étape d'un processus visant à encourager les territoires à s'adapter à ces changements irréversibles, car elles sensibilisent le public au changement climatique. En effet, peu de mesures ou des mesures inadaptées seraient adoptées si nous ne disposions pas de connaissances précises sur le problème auquel nous devons faire face.

Pour que ces connaissances débouchent sur des mesures effectives, il est essentiel d'apporter une aide aux acteurs en proposant de réels services climatiques. Ces services peuvent prendre la forme de portails et d'applications web, comme Climat HD ou comme le portail « DRIAS, les futurs du climat », qui présente l'évolution de nombreux indicateurs climatiques entre la période actuelle et la fin du siècle. D'autres services climatiques plus ciblés, le plus souvent élaborés en collaboration avec des acteurs de divers secteurs, et plus accessibles grâce au Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique, placent les données climatiques au cœur du mécanisme de prise de décision.

En ce sens, **Météo-France participe, aux côtés d'institutions publiques et d'agences d'urbanisme, au développement de projets urbains visant à réduire l'exposition des villes aux effets des ICU**, et à anticiper ainsi le réchauffement climatique, dont les effets se font déjà sentir. **Ces projets offrent une occasion importante d'expérimenter des solutions innovantes qui pourraient par la suite être développées à plus grande échelle afin d'améliorer la résilience des villes face au changement climatique** et à la multiplication des canicules. Météo-France joue un rôle dans les domaines suivants : projection climatique (pour aider à la prise de décisions *ex-ante*), accompagnement (*via* la formation et les actions de sensibilisation) et évaluation des effets du changement climatique (*ex-post*). Dans l'encadré ci-dessous figurent plusieurs exemples de projets urbains auxquels Météo-France a participé, conçus pour atténuer le phénomène des ICU et pour adapter les territoires à la hausse des températures.

## Études de cas : contribution de Météo-France à des projets visant à adapter les villes à la multiplication des canicules



### Projet « Oasis » (Paris)

Pour faire face à la multiplication des canicules, les cours des écoles et des collèges ont été identifiées comme des leviers importants étant donné que ces espaces participent massivement à l'effet d'îlot de chaleur urbain. Dix cours rénovées proposeront des espaces plus naturels, davantage de végétation, une meilleure gestion de l'eau de pluie et des points d'eau. Pensées comme de véritables îlots de fraîcheur au cœur des quartiers, ces cours pourront également accueillir un public plus large en dehors des temps éducatifs. Météo-France contribue à la sensibilisation climatique des élèves, à la formation des enseignants, au recueil de données climatiques *in-situ* et dans le quartier à proximité (groupe témoin), afin de comparer ces

données, et à une évaluation de la réduction des ICU et de l'impact climatique de la transformation (au moyen de simulations).

### Projet « Lisière de Tierce Forêt » (Aubervilliers)

Dans l'une des villes les plus carencées en espaces verts, le projet, qui a bénéficié de l'appui de l'Agence Parisienne du Climat et de Météo-France, a permis la transformation d'un parking asphalté en un espace de vie piéton et végétalisé. Avant la transformation, le parking absorbait 87 % de l'énergie solaire rejetée pendant la nuit (ICU). Météo-France avait installé avant la transformation des stations météo sur le parking et sur un toit à proximité (station témoin) afin de mesurer la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent, la pluviométrie, etc.



Avant la transformation

Ces paramètres ont permis de calculer un indicateur de confort thermique du corps humain, appelé *Universal Thermal Climate Index* (UTCI). Les premiers résultats publiés par Météo-France démontrent l'efficacité de l'opération sur le confort thermique des usagers (Parison S. *et al.*, 2020). Durant les journées étudiées, on a enregistré une baisse de la température ressentie (indice UTCI) de  $-2.5^{\circ}\text{C}$  en moyenne sur 24 heures, allant jusqu'à  $-6^{\circ}\text{C}$  autour de 13h00, et une baisse de la température de l'air sur site allant jusqu'à  $-1^{\circ}\text{C}$  en fin d'après-midi.



Après la transformation



### Projet « Euromed » (Marseille)

L'Établissement public d'aménagement EUROMÉDITERRANÉE, chargé de la réhabilitation urbaine de Marseille, a commandé à Météo-France une étude visant à quantifier les effets climatiques induits par l'opération dite « Euromed 2 » : impact du parc créé à cette occasion, utilisation d'un système de climatisation par boucle à eau de mer, modification du pouvoir réfléchissant des murs. L'étude quantifie séparément ces impacts sur Marseille en période de canicule. Les températures obtenues sur le quartier avec ces hypothèses sont comparées à celles obtenues avec la simulation de cette canicule pour la ville actuelle, ce qui permet de quantifier l'apport relatif de chacune de ces actions d'aménagement. Les résultats montrent que la présence du parc est le levier le plus fort (s'agissant de la différence de température), l'utilisation de la boucle à eau de mer venant en second. Quant à l'augmentation du pouvoir réfléchissant des murs, elle ne procure, dans le contexte marseillais, qu'un gain limité et peut même se révéler contre-productive. L'organisme d'aménagement a pu s'appuyer sur ce projet pour prendre les meilleures décisions au vu de l'objectif d'adaptation de la ville au changement climatique, notamment pour faire face aux canicules.

#### Sources :

<https://www.paris.fr/pages/les-cours-oasis-7389> ; <https://www.apc-paris.com/actualite/lisiere-tierce-foret-nouvel-ilot-fraicheur-a-aubervilliers> ; <https://www.adaptation-changement-climatique.fr/initiatives/euromed-etude-limpact-amenagement-urbain-sur-marseille-en-période-canicule>.

Météo-France n'a contribué que partiellement aux connaissances dont nous disposons aujourd'hui sur le changement climatique et sur la future augmentation des ICU. Le niveau de sensibilisation du public à ce

problème aurait été probablement aussi élevé dans notre scénario contrefactuel. Toutefois, **l'existence d'un service météorologique national permet de disposer, en France, de projections climatiques plus précises et régionalisées, avec des grilles de résolution plus fines, et de services climatiques dédiés, qui sont essentiels à la mise en œuvre de mesures efficaces permettant aux territoires de s'adapter à des échelles hyperlocales.** Si nous avons mis l'accent sur le rôle joué par Météo-France pour nous adapter à la multiplication des canicules à venir, il convient de noter que les services climatiques fournis par cet établissement peuvent également aider les autorités locales à adapter leurs territoires à la hausse probable d'autres aléas naturels qui n'entrent pas dans le champ de la présente évaluation (par exemple, les précipitations extrêmes).

**En outre, le rôle des données spatiales fournies par Copernicus n'est pas non plus pris en compte dans le présent rapport. Les satellites Sentinel-2 permettent de cartographier tous les espaces verts urbains et des indices de végétation peuvent être calculés afin de détecter les endroits carencés en espaces verts et devant être végétalisés pour atténuer les canicules et les ICU.** Des villes telles que Valence (Espagne), Rennes (France) ou Pilsen (République tchèque) ont déjà utilisé des données fournies par Copernicus pour ajuster leur planification urbaine en matière d'espaces verts et de rénovation des parcs, dans une perspective d'adaptation au changement climatique<sup>111</sup>.

## B. Pollution atmosphérique urbaine

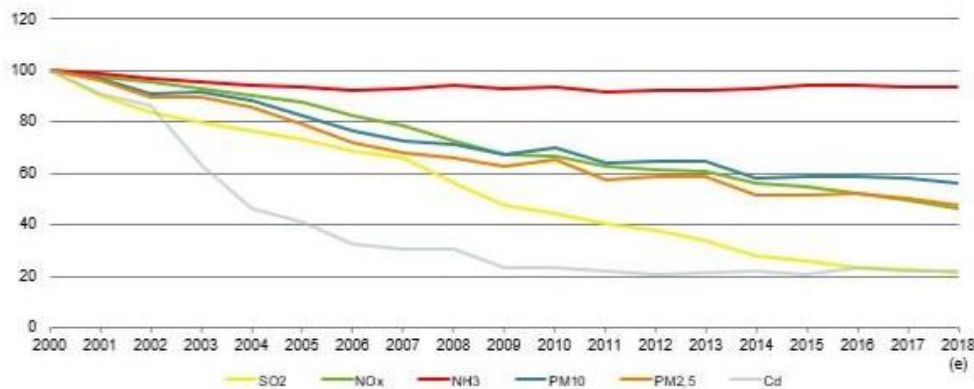
La pollution de l'air est une détérioration de la qualité de l'air qui peut être quantifiée en mesurant les quantités de polluants chimiques, biologiques et physiques. Ce phénomène peut avoir des conséquences importantes sur la santé humaine et l'environnement (faune, flore, sols, bassins hydrographiques, climat). Nous distinguons plusieurs types de polluants dont les causes et les effets diffèrent : les particules ( $PM_{10}$  et  $PM_{2.5}$ , c'est-à-dire les particules de diamètre inférieur à, respectivement, 10 micromètres et 2,5 micromètres), les oxydes d'azote (NOx), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les composés organiques volatils (COV), l'ozone (O<sub>3</sub>), l'ammoniac (NH<sub>3</sub>), etc.

Les pics ou épisodes de pollution atmosphérique ont lieu principalement dans les zones urbaines et sont causés par des activités humaines (industries, transports, chauffage domestique, etc.). Cependant, les zones rurales peuvent également être affectées, par déplacement de polluants en provenance des zones urbaines ou directement par les activités agricoles ou les cheminées des habitations. En France, les émissions de polluants sont en diminution depuis 2000, grâce à l'application de nouvelles réglementations, au développement de la surveillance de la qualité de l'air et à la mise en œuvre de mesures correctives et préventives plus nombreuses et plus sévères (à long et court termes).

---

<sup>111</sup> Source : <https://www.copernicus.eu/en/news/news/observer-copernicus-services-helping-cities-adapt-climate-change>.

Figure 31 : Évolution des émissions de polluants en France métropolitaine (en indice base 100)



Source : Citepa, Ministère de la transition écologique (avril 2019)

Le ministère de la transition écologique a rappelé que la pollution de l'air cause environ 48 000 décès prématurés par an (dont 6 000 en Île-de-France), soit 9 % de la mortalité en France, et une perte d'espérance de vie à 30 ans pouvant dépasser deux ans<sup>112</sup>.

Météo-France a indiqué<sup>113</sup> qu'il **contribuait au système de surveillance et de prévision de la qualité de l'air à l'échelle nationale en apportant son expertise météorologique aux acteurs nationaux et régionaux**, notamment au Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) et aux associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (Aasqa), et en modélisant les concentrations de polluants à l'aide de son modèle de chimie-transport. Dans ce cadre, **Météo-France participe à la mise en œuvre de la plateforme de prévision et de cartographie de la qualité de l'air Prév'Air**, développée et gérée par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), avec l'appui de Météo-France, du CNRS et du LCSQA. Météo-France et l'Ineris participent également depuis plusieurs années à des programmes nationaux et européens d'évaluation, de prévision et d'analyse de la qualité de l'air en France et en Europe. Depuis 2015, les deux établissements pilotent conjointement le volet du programme Copernicus Atmosphère consacré à la qualité de l'air en Europe.

Bien que Météo-France ne soit pas le seul acteur à œuvrer en faveur de prévisions de la qualité de l'air fiables, sa contribution à cet égard est essentielle. La qualité de l'air dépend de divers facteurs, comme les activités industrielles, les transports, le chauffage domestique, mais aussi des conditions météorologiques qui, en particulier, **influent considérablement sur le niveau de pollution de l'air** via des effets indirects (par exemple, on utilise davantage la voiture que le vélo pendant les périodes pluvieuses et froides, ce qui entraîne un niveau plus élevé d'émissions) et des effets directs (par exemple, la transformation et la dispersion des polluants). Ces effets directs dépendent de quatre variables météorologiques spécifiques<sup>114</sup> :

- **le rayonnement solaire** transforme les oxydes d'azote et les composés organiques volatils en ozone ;
- **le vent** disperse les polluants, ce qui signifie que, dans une zone donnée, plus la vitesse du vent est faible, et plus les polluants risquent de s'accumuler. Le vent peut également déplacer les polluants, ce qui n'est pas toujours propice à une bonne qualité de l'air, particulièrement lorsque la direction du vent est clairement définie vers une zone spécifique qui deviendra excessivement polluée ;
- **les températures**, lorsqu'elles sont trop élevées ou trop basses, sont défavorables à la qualité de l'air. La volatilité de certains composés, par exemple les composés organiques volatils, augmente avec la température. Le froid augmente les rejets automobiles du fait d'une moins bonne combustion. Enfin,

<sup>112</sup> Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/pollution-lair-origines-situation-et-impacts>.

<sup>113</sup> Source : <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/avec-meteo-france/journee-de-la-qualite-de-lair-pics-de-chaaleur-et-pollution>.

<sup>114</sup> Source : <https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/article/influence-de-la-meteo>.



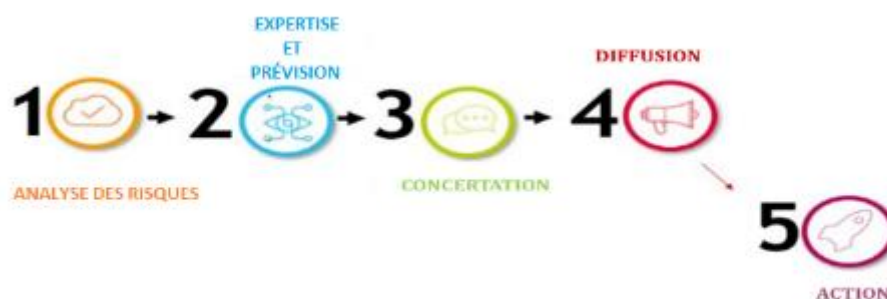
la chaleur estivale et l'ensoleillement favorisent les processus photochimiques, comme la formation d'ozone ;

- **les précipitations** sont généralement bénéfiques pour la qualité de l'air car elles « lessivent » l'atmosphère en diminuant les concentrations de polluants dans cette dernière. Cependant, ce phénomène présente des effets pervers. Par exemple, pour les oxydes d'azote, le lessivage est un phénomène efficace pour réduire ces concentrations mais, par leur interaction chimique avec l'eau, les oxydes d'azote participent à la formation des pluies acides. Les particules ainsi « lessivées » se retrouvent dans le sol et participent à la pollution des sols et des eaux.

**Cela montre qu'il importe de réaliser des prévisions météorologiques à une échelle très locale car la qualité de l'air dépend fortement des conditions météorologiques.** Par conséquent, les prévisions météorologiques permettent de prévoir la qualité de l'air à court terme. Aujourd'hui, le système national de surveillance et de prévision de la qualité de l'air fournit des prévisions fiables d'épisodes de pollution jusqu'à deux jours à l'avance. Dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, les prévisions pour 2020 ont montré que la probabilité de bonne détection d'un épisode de pollution était de 79 % pour le jour même et de 52 % pour le lendemain<sup>115</sup>. Les erreurs de prévision ont des causes diverses, notamment la difficulté de quantifier directement les émissions de polluants, l'absence de topographie dans le système permettant de calculer le débit ou les incertitudes quant aux prévisions de vent qui peuvent être importantes selon le modèle utilisé et selon les reliefs.

Le dispositif de gestion des épisodes de pollution de l'air en France se divise en cinq étapes, exposées ci-après.

Figure 32 : Dispositif de gestion des épisodes de pollution de l'air



Source : Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

Météo-France intervient à la seconde étape du processus, avec les autres organisations météorologiques européennes qui participent à la chaîne de production des prévisions météorologiques (à savoir EUMETSAT et le CEPMMT) et les partenaires contribuant au système national de surveillance et de prévision Prév'Air. **Cette étape est particulièrement importante pour informer les pouvoirs publics locaux, afin qu'ils puissent prendre des mesures de réduction de la pollution de l'air et de ses effets sur la santé et l'environnement. Si Météo-France était absent de ce processus et que le modèle américain GFS lui était substitué, il est probable que le dispositif en serait considérablement affecté car celui-ci requiert des prévisions météorologiques fiables et réalisées à une échelle très locale, particulièrement en ce qui concerne le vent, dont la vitesse et la direction peuvent varier, même à de petites échelles.**

Le préfet de chaque département concerné met en œuvre les mesures applicables sur le territoire départemental en prenant un arrêté, après avoir consulté le conseil départemental de l'environnement et des

<sup>115</sup> Source : <https://www.atmo-auvergnerrhonealpes.fr/actualite/comment-sont-evaluees-les-performances-de-prevision-de-la-qualite-de-lair>.

risques sanitaires et technologiques (étape 3). Les mesures d'urgence<sup>116</sup> peuvent concerner les transports (réduction de la vitesse des véhicules, trafic différencié ou alterné, immobilisation des véhicules les plus polluants utilisés par le gouvernement et les administrations, tarifs réduits ou gratuits des transports publics, gratuité des parkings voiture, etc.), l'industrie (réduction de l'activité ou mise à l'arrêt de certains sites industriels polluants), les activités agricoles autour des villes (interdiction de brûler les déchets végétaux agricoles, report recommandé des opérations de pulvérisation d'engrais, etc.), le chauffage domestique ou, simplement, des actions visant à sensibiliser les acteurs locaux.

Figure 34 : Moyenne annuelle des concentrations de PM2.5 en France en 2009

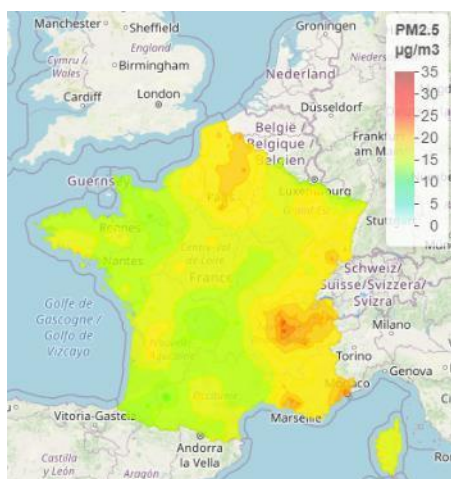
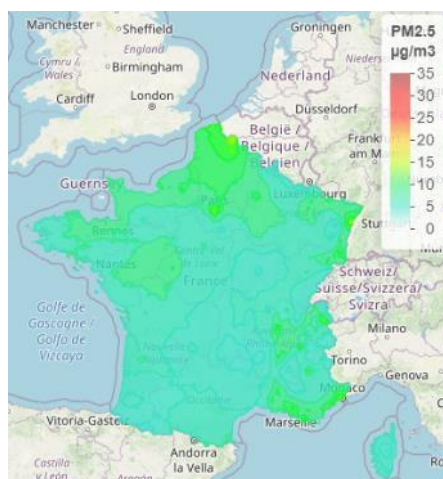


Figure 33 : Moyenne annuelle des concentrations de PM2.5 en France en 2019



Source : Ineris

En cas d'épisode de pollution prolongé, les mesures sont maintenues pendant plusieurs jours sans interruption tant que les conditions météorologiques restent propices à la poursuite de l'épisode en question. Toutes ces mesures, auxquelles s'ajoutent une surveillance améliorée, de nouvelles réglementations et des mesures au long cours (comme les incitations à utiliser le vélo et les transports publics), ont

contribué à améliorer considérablement la qualité de l'air ces dix dernières années, ce qui a empêché les dommages sur la santé et l'environnement d'augmenter.

Les cartes ci-dessus<sup>117</sup> indiquent la moyenne annuelle des concentrations de PM2.5 en France en 2009 (carte figurant à gauche) et en 2019 (carte figurant à droite). La moyenne annuelle nationale a baissé de 50 % entre ces deux années, ce qui montre l'efficacité du dispositif français de gestion de la pollution de l'air. Étant donné toutefois que 28 % de la population reste exposée à des valeurs supérieures au seuil recommandé par l'OMS, des progrès restent à faire en matière de qualité de l'air. Cependant, nous observons une forte amélioration de la situation, car, en 2009, l'ensemble du territoire était exposé à des niveaux supérieurs à ce seuil. Bien que nous ne soyons pas en mesure de déterminer la contribution de Météo-France à ce résultat, nous estimons que l'établissement joue un rôle prépondérant dans la surveillance des épisodes de pollution et de leur évolution (tous types de polluants confondus) ainsi que dans l'information des pouvoirs publics locaux, permettant ainsi la mise en œuvre de mesures optimales.

**Le service fourni par Météo-France est appuyé à l'échelle européenne par le programme Copernicus via son service de surveillance de l'atmosphère (CAMS).** Ce service a été mis en place en 2014 par le CEPMMT au nom de la Commission européenne et en partenariat avec l'ESA et EUMETSAT. Il est devenu pleinement opérationnel en 2015. Les principales prestations qu'il offre consistent à :

- fournir des cartes et des données afin d'établir des prévisions régionales de la qualité de l'air ;
- fournir des évaluations rétrospectives de la qualité de l'air ;
- recenser les polluants et déterminer leur source ;
- déterminer les niveaux de concentration des pollens dans l'atmosphère ;
- apporter des ressources pour évaluer de possibles mesures de contrôle des émissions ;

<sup>116</sup> Pour des mesures supplémentaires, voir <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques-reduire-pollution-lair> ou [http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ppa\\_complet.pdf](http://www.driee.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ppa_complet.pdf).

<sup>117</sup> Source : <https://www.ineris.fr/fr/recherche-appui/risques-chroniques/mesure-prevision-qualite-air/20-ans-evolution-qualite-air>.

- aider à l'élaboration de prévisions de la qualité de l'air à l'échelle locale, d'informations en matière de santé et d'alertes<sup>118</sup>.

**Le présent rapport n'examine pas en détail le rôle des services fondés sur des données spatiales, mais il importe de noter que le CAMS s'est avéré être un service très complet pour appuyer l'expertise fournie par Météo-France et par d'autres services météorologiques nationaux en Europe afin d'améliorer la surveillance de la pollution de l'air et les prévisions en la matière.** En outre, l'arrivée ces prochaines années de Sentinel-4 et Sentinel-5, spécialement conçus pour répondre aux besoins du CAMS, permettra d'avoir accès à un grand nombre de données supplémentaires pour surveiller les sources d'émission et la qualité de l'air, et de bénéficier d'un système de surveillance continue de la pollution atmosphérique.

---

<sup>118</sup> Plus d'informations sur ce service à l'adresse suivante :

[https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus\\_AtmosphereMonitoring\\_Feb2017.pdf](https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus_AtmosphereMonitoring_Feb2017.pdf).

## 5. Recherche dans les domaines du climat et de l'environnement

### A. Recherches utilisant des données d'observation de la Terre

Le premier et principal résultat des activités d'observation de la Terre a été d'aider la communauté scientifique à mener des recherches dans divers domaines<sup>119</sup>. Si Copernicus a fait émerger des services opérationnels fondés sur des données spatiales, ce programme est aussi largement utilisé dans la recherche scientifique, rendant assez floue la distinction entre utilisation opérationnelle et utilisation à des fins de recherche. De plus, depuis 2009, l'ESA a entrepris des missions d'exploration de la Terre, en partenariat avec le CNES et d'autres agences spatiales, de nouveaux satellites devant être lancés au cours des prochaines années. Les missions d'exploration de la Terre concernent principalement l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et l'intérieur de la Terre, l'accent étant mis sur **une meilleure compréhension des interactions entre ces éléments et sur les effets des activités humaines sur les processus naturels de la Terre.**

Figure 35 : Exemples de missions d'exploration de la Terre

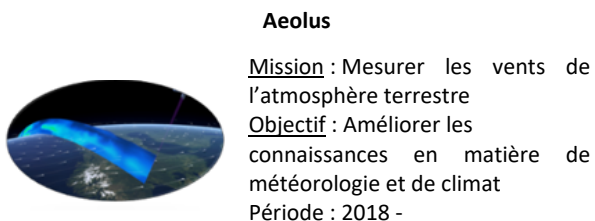
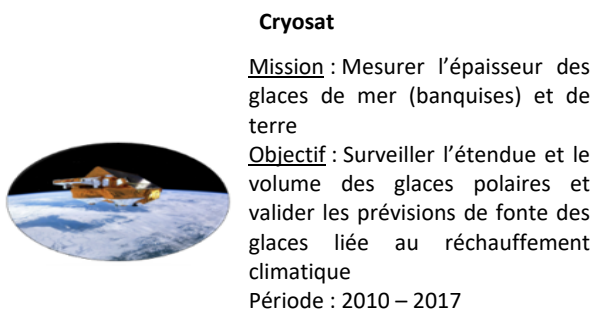
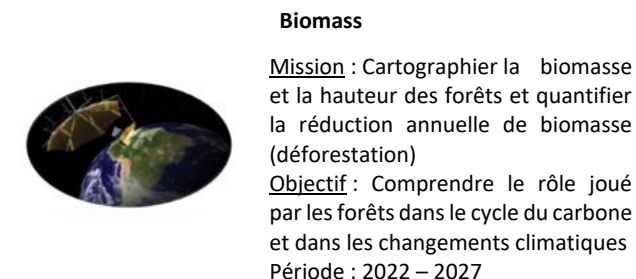
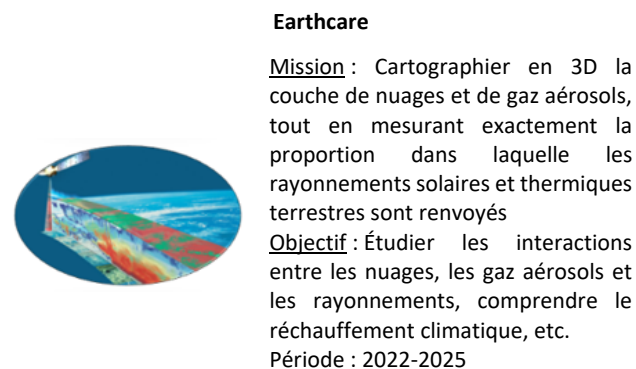


Figure 36 : Futures missions d'exploration de la Terre



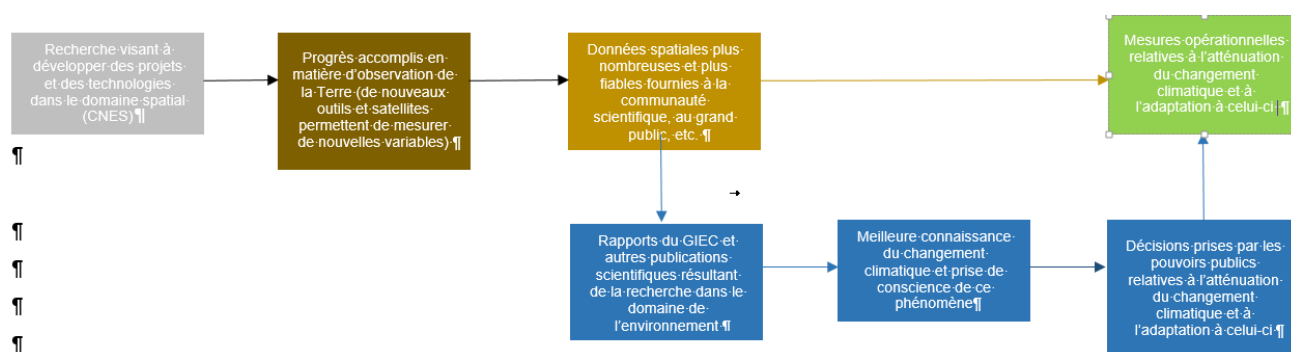
Source : réalisé par les auteurs

<sup>119</sup> Cette affirmation a été confirmée lors d'entretiens menés avec des représentants de l'ESA et du CNES.

L'ESA et le CNES ont déjà commencé à travailler sur le développement de futures missions d'exploration de la Terre (mise au point de technologies, fabrication de satellites, etc.) telles que les missions Flex, Earthcare et Biomass. En outre, le CNES a développé ses propres missions scientifiques, souvent avec des agences spatiales nationales d'envergure mondiale, parmi lesquelles les agences américaine (NASA), allemande (DLR), indienne (ISRO) et chinoise (CNSA). Les projets récents (élaborés au cours des vingt dernières années) auxquels le CNES a participé et qui ont été utilisés dans des recherches dans le domaine de l'environnement figurent à l'annexe D.

Les observations de la Terre réalisées dans le cadre de toutes ces missions ont véritablement contribué à faire progresser la recherche dans les domaines de l'environnement et du climat. Même si la recherche ne contribue qu'indirectement à la réalisation des objectifs liés aux questions environnementales, en particulier climatiques, son rôle est fondamental. Les impacts environnementaux obtenus grâce à la recherche peuvent être expliqués par deux mécanismes, exposés ci-après.

Figure 37 : Chaîne des impacts obtenus grâce à la recherche



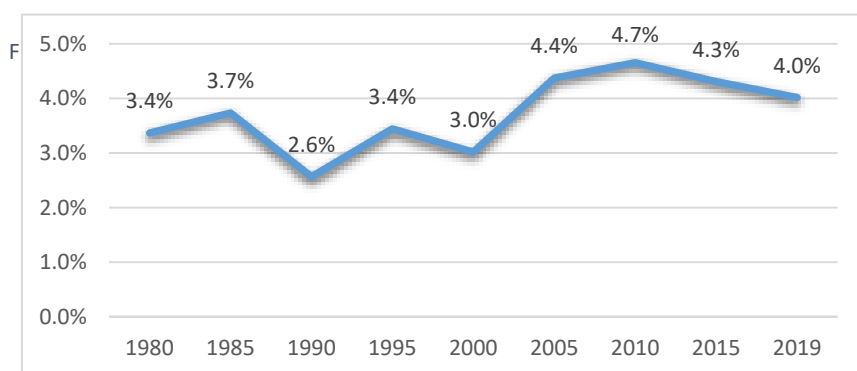
Source : réalisé par les auteurs

Le premier mécanisme est représenté dans la figure ci-dessus par la flèche orange. **La recherche réalisée dans le cadre de missions spatiales est la toute première étape d'un processus qui mène, à un moment donné, à une étape opérationnelle, comme cela a été le cas avec le programme Copernicus. Plus les données spatiales obtenues sont fiables et complètes, plus il y aura de services opérationnels fondés sur ces données pour répondre aux préoccupations environnementales.** La mission Jason illustre bien ce mécanisme : il y a 30 ans, le CNES et la NASA ont collaboré pour mettre sur pied une mission de recherche océanographique, la mission Topex-Poséidon, pour mesurer la topographie des océans et, ainsi, observer l'élévation du niveau des mers. Cette première mission a ouvert la voie à d'autres missions (Jason-1, lancée en 2001, puis Jason-2, Jason-3 et Jason-CS lancées au cours des années suivantes). Comme cela a été souligné lors des entretiens conduits avec des représentants des agences spatiales, passer du recueil de données spatiales à la gestion opérationnelle est impossible sans une étape intermédiaire d'investissement dans la recherche-développement menée avec l'industrie spatiale. Le succès des premières versions de la mission a été tel qu'EUMETSAT a décidé d'y collaborer pour l'utiliser à des fins d'observation météorologique. Ce succès a finalement incité l'ESA à intégrer cette mission au programme européen Copernicus afin d'appuyer le développement de nombreux services opérationnels, dans des domaines tels que la météorologie, les services climatiques ou l'océanographie (gestion des zones côtières, transport maritime, pollutions marines, etc.). Comme cela a déjà été expliqué, **les services opérationnels aideront divers acteurs à optimiser leurs activités, ce qui in fine produira des impacts positifs diffus sur l'environnement.**

Le second mécanisme est représenté dans la figure ci-dessus par les flèches bleues. Le raisonnement est le suivant : le nombre croissant de données spatiales disponibles et leur plus grande fiabilité ont été

déterminants pour améliorer la recherche en climatologie et dans d'autres domaines environnementaux. Ce mécanisme est important du fait que **la recherche améliore notre connaissance du climat et du changement climatique, ce qui est crucial pour l'adoption de mesures optimales au moment le plus opportun**. En particulier, ces dernières années, un intérêt grandissant pour les questions liées au changement climatique a été observé dans la population et chez les responsables politiques. Cette prise de conscience de plus en plus large repose sur la diffusion d'un nombre croissant d'informations sur le changement climatique et une meilleure connaissance de ce phénomène, principalement due aux progrès de la recherche. Ces progrès ont été de plus en plus médiatisés grâce aux rapports publiés par le GIEC, qui s'attachent à fournir aux décideurs politiques, de façon régulière, un état des connaissances scientifiques sur le changement climatique, ses conséquences et les risques futurs qui y sont associés, et à proposer des solutions en matière d'adaptation et d'atténuation. **Il est essentiel de renforcer la prise de conscience et la compréhension des décideurs politiques vis-à-vis des risques climatiques afin que des mesures optimales soient prises pour faire face au changement climatique et s'y adapter.**

Pour illustrer ce dernier point, nous nous sommes attachés à estimer le nombre de publications scientifiques dans le domaine environnemental susceptibles d'avoir utilisé des données d'observation de la Terre. Nous nous sommes concentrés sur les laboratoires de recherche situés dans des États membres de l'ESA afin de limiter notre champ d'investigation aux activités d'observation de la Terre menées en Europe. Nous avons utilisé le logiciel The Lens<sup>120</sup> pour effectuer cette analyse et appliqué un algorithme pour recenser **tous les articles ayant trait à l'environnement<sup>121</sup> qui mentionnent dans leur résumé ou dans leur titre au moins l'un de ces mots-clés spécifiquement associés à l'espace : « Earth observation », « satellite » ou « Copernicus »**. Depuis l'an 2000, 146 132 articles répondent à ces critères dans le monde, et, pour **24 934** d'entre eux, au moins l'un des auteurs travaillait dans un laboratoire situé dans un État membre de l'ESA. Cela représente en moyenne une proportion de 4,2 % de tous les articles ayant trait à l'environnement publiés depuis vingt ans. Le graphique ci-dessous illustre l'évolution de cette proportion au fil des ans.



Nous observons que parmi l'ensemble des articles relatifs à l'environnement, la proportion d'articles se fondant sur des données d'observation de la Terre, et auxquels des membres de l'ESA ont contribué, est en augmentation depuis vingt ans, ce qui montre que les recherches portant sur des sujets environnementaux s'appuient de plus en plus sur l'observation de la Terre.

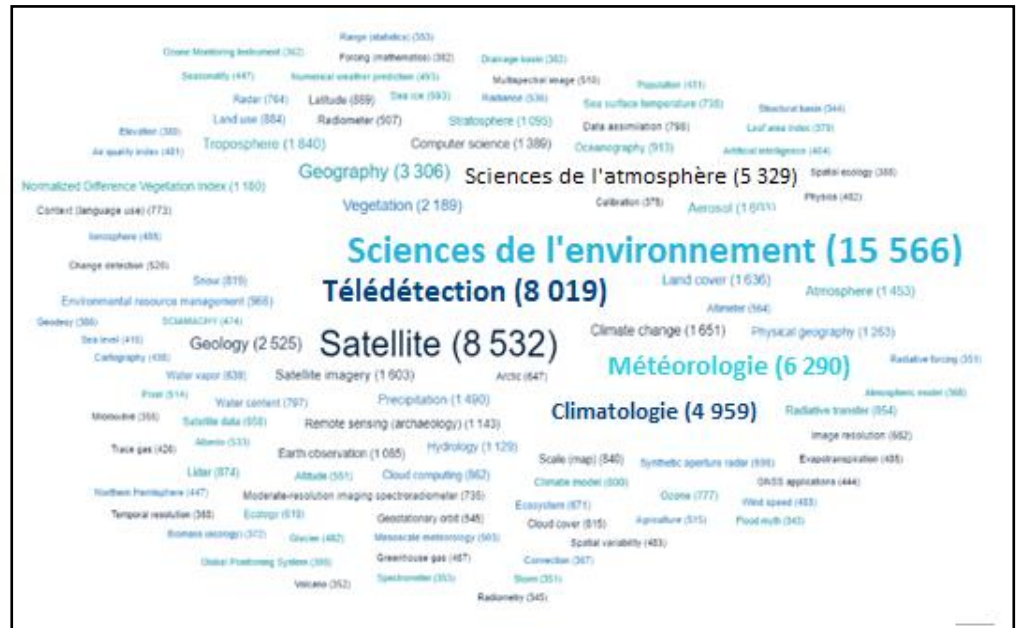
Source : estimation réalisée à partir de données du logiciel The Lens

<sup>120</sup> The Lens est un agrégateur de métadonnées destiné à rechercher, analyser et gérer des données issues de publications scientifiques, de brevets, etc. et à partager les connaissances liées à ces données.

<sup>121</sup> The Lens indique les domaines d'étude couverts par chaque article. Un article peut couvrir plusieurs domaines. Les articles pris en compte ici couvrent au moins un domaine ayant trait d'une manière ou d'une autre à l'environnement, parmi la liste suivante : sciences de l'environnement, météorologie, gestion des ressources environnementales, occupation des sols, végétation, utilisation des sols, informatique en nuage, changement climatique, indice de végétation par différence normalisé, développement durable, planification environnementale, détection de variation, hydrologie, climatologie, géographie physique, agriculture, sciences de l'atmosphère, science du système terrestre, surveillance de l'environnement.

Figure 39 : Domaines couverts par les publications fondées sur des données d'observation de la Terre

En approfondissant l'analyse, nous observons sur la figure ci-contre que les 24 934 publications recensées couvraient un large éventail de sujets, tels que la météorologie, la climatologie, le changement climatique, mais aussi l'écologie, la science de l'atmosphère, la végétation, etc. **Cela illustre le potentiel des activités d'observation de la Terre pour appuyer la recherche dans des domaines environnementaux divers, au-delà du changement climatique.**



Source : analyse effectuée à partir de données fournies par le logiciel The Lens

Pour conclure cette analyse, l'encadré ci-après présente succinctement deux exemples d'articles scientifiques, dont les auteurs ont exploité des données d'observation de la Terre pour étudier le climat et son évolution (ces articles figurent parmi les plus cités des 24 934 publications recensées).

#### Exemples d'articles scientifiques utilisant des données d'observation de la Terre

« *Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply* » (*Récent ralentissement de l'évapotranspiration à l'échelle mondiale dû à une limitation de l'eau disponible dans les sols*), Jung et al. (2010)

- Cité au moins 1 424 fois dans des publications scientifiques
- Estime l'évolution de l'évapotranspiration terrestre mondiale annuelle entre 1982 et 1997
- S'appuie, entre autres, sur des observations de la Terre pour estimer que l'évapotranspiration a augmenté en moyenne de 7,1 millimètres par décennie
- Augmentation de l'évapotranspiration = un des indicateurs du réchauffement climatique

→ Utile pour renforcer nos connaissances sur le changement climatique

« *Response of ocean ecosystems to climate warming* » (*Réponse des écosystèmes océaniques au réchauffement climatique*), Sarmiento et al. (2004)

- Cité au moins 757 fois dans des publications scientifiques
- Cité au moins une fois dans un rapport du GIEC
- Détermine la réponse biologique des océans au réchauffement climatique entre la révolution industrielle et 2050 : → prévisions concernant les quantités de chlorophylle dans diverses régions du monde en fonction de plusieurs scénarios climatiques
- Exploite des données satellitaires (fondées sur des variations de couleur) associées à des observations du climat pour développer un modèle empirique
- Baisse de la quantité de chlorophylle = moindre absorption de CO<sub>2</sub> par les océans
- La réponse au réchauffement climatique diffère selon les régions du monde

→ Utile pour mieux comprendre les mécanismes physiques et les conséquences du réchauffement climatique

## B. Les organisations météorologiques, actrices de la recherche climatologique et utilisatrices de données d'observation de la Terre

Les travaux de recherche sur le climat conduits par Météo-France au Centre national de recherches météorologiques (CNRM) produisent en particulier des projections climatiques sur plusieurs décennies, voire sur plusieurs siècles. **Ces projections peuvent être utiles à tous les secteurs car elles peuvent étayer les stratégies d'adaptation au changement climatique et d'atténuation de ce phénomène.** Par exemple, elles peuvent fournir des éclairages sur les questions liées aux services rendus par la biodiversité et les écosystèmes dans le futur ou servir à concevoir des politiques d'aménagement du territoire, des politiques de développement touristique, etc.

**La recherche effectuée chez Météo-France vise aussi à améliorer notre compréhension des variables climatiques et de leur évolution afin de renforcer la qualité des modèles de prévision météorologique.** Autrement dit, tous les impacts que nous avons mis en lumière dans le présent rapport, qui résultent de la bonne qualité des prévisions météorologiques, dépendent également des activités de recherche-développement menées dans le domaine météorologique en amont de la chaîne de valeur ajoutée.

Parmi les divers domaines susmentionnés où les données d'observation de la Terre sont utilisées pour faire progresser la recherche, **la météorologie fait partie des plus grands utilisateurs de ce type de données. En effet, les organisations météorologiques ont fondamentalement besoin de s'appuyer sur l'observation de l'atmosphère, des sols et des océans pour conduire leurs recherches en matière de climat et de prévisions météorologiques.**

La recherche climatique conduite chez Météo-France est déterminante pour que les décideurs politiques puissent prendre des mesures d'atténuation et d'adaptation appropriées. La chaîne des impacts – depuis les observations de la Terre fournies par EUMETSAT jusqu'aux mesures en faveur de l'environnement, en passant par la recherche climatique chez Météo-France – est décrite dans la partie précédente intitulée « **Recherches utilisant des données d'observation de la Terre** » (représentée dans la figure par les flèches bleues). **Le CNRM contribue à ce que d'importants progrès soient réalisés en matière de climat et de changement climatique**, de physique de l'atmosphère et de processus intervenant, entre autres, dans l'atmosphère, dans l'océan, sur les surfaces continentales ou dans le cycle du carbone, faisant ainsi avancer la science tout en nourrissant les travaux du GIEC. En outre, certains chercheurs de Météo-France participent à la rédaction des rapports du GIEC, dont EUMETSAT et l'ESA sont par ailleurs d'importants contributeurs, car **environ la moitié des 57 variables climatiques essentielles qui décrivent le système terrestre et sur lesquelles s'appuient ces rapports dépendent d'observations spatiales**<sup>122</sup>. Pour illustrer ce constat, dans le dernier rapport du GIEC (AR6) publié en 2021, 283 produits de données ont été utilisés, dont 126 ont été recueillis au moyen de l'observation spatiale (soit 45 %). EUMETSAT a contribué au recueil de 45 produits d'observation, soit 36 % des 126 jeux de données qui non pas été recueillis *in situ*<sup>123</sup>.

L'information sur le changement climatique issue de la recherche (y compris celle conduite chez Météo-France), qui est de plus en plus médiatisée grâce aux rapports du GIEC, est déterminante pour accélérer la mise en œuvre de stratégies politiques allant dans la bonne direction, afin d'atténuer le changement climatique le plus vite possible. Compte tenu du caractère irréversible et cumulatif de certains effets du changement climatique, plus tôt des actions seront mises en œuvre et moins il en coûtera à l'avenir, lorsqu'il sera trop tard pour l'atténuation et qu'il deviendra nécessaire de s'adapter à la nouvelle situation climatique. Le modèle de Hope se fonde sur ce raisonnement<sup>124</sup>. Selon cet économiste, l'information sur le changement

<sup>122</sup> Le programme Copernicus en est le principal fournisseur, couvrant une large variété de données dans le monde entier.

<sup>123</sup> Source : entretien avec des représentants d'EUMETSAT.

<sup>124</sup> Hope C. (2015). *The \$10 trillion value of better information about the transient climate response*.



climatique, et sur le réchauffement climatique en particulier, est essentielle pour éviter des coûts très lourds à l'avenir. Le modèle examine la réponse climatique transitoire aux émissions de CO<sub>2</sub>, qui décrit l'augmentation de la température moyenne mondiale causée au bout de 70 ans par une hausse de 1 % par an de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Cet auteur estime la valeur d'une meilleure information sur la réponse climatique transitoire reçue à temps pour l'année 2020 à 9,29 trillions d'euros (en euros 2021<sup>125</sup>), ce qui correspond à la somme des coûts de réduction des émissions et des coûts d'adaptation évités à l'échelle mondiale (en valeur actuelle nette sur 70 ans). Une meilleure information sur la réponse climatique transitoire reçue à temps pour l'année 2030 est estimée à « seulement » 8,76 trillions d'euros (en euros 2021<sup>126</sup>) parce que la société aura attendu trop longtemps avant d'agir (en raison d'un manque d'information fiable sur la réponse climatique transitoire). Dans ce cas, la société ne sera pas capable d'éviter certaines conséquences du changement climatique et devra supporter des coûts d'adaptation qui n'auraient pas été nécessaires si elle avait eu l'information en 2020. Autrement dit, **la valeur additionnelle moyenne liée à la réception à temps d'une meilleure information sur la réponse climatique transitoire afin de pouvoir réoptimiser les émissions en 2020 plutôt qu'en 2030 est de l'ordre de 530 milliards d'euros**. Ce modèle illustre l'importance d'affiner nos connaissances et nos projections sur le changement climatique pour prendre les bonnes mesures le plus tôt possible. Ainsi, **la recherche climatique, étayée par des données d'observation de la Terre, a un rôle fondamental à jouer dans l'amélioration de ces connaissances, afin d'atténuer les émissions dès aujourd'hui et d'éviter des coûts d'adaptation énormes à l'avenir**.

## 6. Impacts directs des organisations

Les activités de Météo-France, du CEPMMT, d'EUMETSAT, du CNES et de l'ESA sont des activités de services. En tant que telles, elles n'ont pas d'effets directs sur les écosystèmes. Toutefois, ces activités requièrent une consommation d'énergie importante, en particulier pour faire fonctionner les supercalculateurs et les infrastructures (locaux, centres de données, etc.), qui contribue aux émissions de GES et, finalement, au changement climatique.

Notre base de comparaison étant un scénario contrefactuel, les impacts ne devraient pas, en principe, être exprimés en termes absolus. Toutefois, nous avons imaginé, dans ce scénario, que Météo-France et le CNES n'existeraient pas sans les subventions allouées par l'État français. Nous estimons donc les impacts des activités de ces deux organisations en termes absolus. En ce qui concerne le CEPMMT, EUMETSAT et l'ESA, il n'était pas possible de déterminer avec certitude le niveau de réduction de leur consommation énergétique dans le scénario postulant un niveau de services dégradé. Nous avons donc décidé de ne pas inclure ces organisations dans la présente analyse.

À notre connaissance, les émissions de GES de Météo-France ne sont pas publiques, mais l'établissement a accepté de nous communiquer son empreinte carbone pour l'année 2020 ainsi que quelques données pour l'année 2019 à ce sujet. L'année 2020 a été très atypique en raison de la crise liée à l'épidémie de covid-19. Nous présentons donc les impacts pour l'année 2019, qui paraît plus représentative du niveau habituel d'émissions des activités de Météo-France. Comme pour n'importe quel autre type d'activités, celles de Météo-France contribuent à des émissions (indirectes) dites de catégorie 3 : déplacements domicile-travail des salariés, déplacements professionnels, consommation énergétique des salariés qui télétravaillent, etc. Toutefois, ces impacts ne sont pas très pertinents puisqu'ils auraient lieu même si Météo-France n'existait pas, car les salariés travailleraient ailleurs et consommeraient de l'énergie de la même façon. Les émissions

<sup>125</sup> 10,26 trillions de dollars en dollars 2005, convertis en euros (cours du change du 1<sup>er</sup> janvier 2005) et corrigés en fonction de l'inflation jusqu'en 2021.

<sup>126</sup> 9,67 trillions de dollars en dollars 2005, convertis en euros (cours du change du 1<sup>er</sup> janvier 2005) et corrigés en fonction de l'inflation jusqu'en 2021.

directement liées aux activités météorologiques (dites émissions de catégories 1 et 2) sont plus intéressantes dans le cadre de la présente étude. Elles découlent en particulier de la consommation énergétique des infrastructures, des radars et des supercalculateurs utilisés pour produire des prévisions météorologiques et des projections climatiques. Il est à noter que notre estimation des émissions des supercalculateurs ne couvre pas l'intégralité de leur cycle de vie (notamment la phase de fabrication qui est une source d'émissions importante).

En 2019, Météo-France a consommé environ 24,36 GWh pour alimenter ses locaux et ses infrastructures *in situ* (par exemple, les radars) et presque 20 GWh uniquement pour alimenter ses supercalculateurs. Ainsi, **l'établissement a émis environ 6 600 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> en 2019 (dont 1 180 t éq. CO<sub>2</sub> pour faire fonctionner ses supercalculateurs) qui auraient pu être évitées si Météo-France n'avait pas existé.** La consommation d'énergie des locaux tend à diminuer chez Météo-France (au moins depuis 2018) et cette tendance se poursuit, l'objectif de l'établissement étant de réduire sa consommation d'énergie finale de 40 % en 2030 par rapport à son niveau de 2019. En ce qui concerne l'énergie destinée aux ordinateurs, la mise en service de nouveaux supercalculateurs toujours plus puissants entraîne une hausse des niveaux de consommation électrique et, par conséquent, des émissions (presque 2 000 t éq. CO<sub>2</sub> en 2020). Cependant, **bien que les ordinateurs et les radars représentent la majorité de la consommation énergétique de Météo-France, ils ne produisent qu'un tiers des émissions de GES de l'établissement,** car ils sont principalement alimentés par de l'électricité et sont implantés en France métropolitaine (l'intensité en carbone de l'électricité y est moindre que dans les territoires français d'outre-mer, une grande partie de cette électricité étant produite à partir d'énergies nucléaire et hydraulique).

**Bien que les prévisions météorologiques ne soient pas une activité neutre en carbone, nous pouvons raisonnablement affirmer que cette externalité est plus que compensée par tous les bénéfices environnementaux** que cette activité apporte. Selon les analyses quantitatives fournies dans le présent rapport, **les prévisions météorologiques de Météo-France permettent d'éviter l'émission d'au moins 3 348 kilotonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an (soit 3 348 000 tonnes)** (agrégation des bornes inférieures des estimations d'impacts dans les domaines suivants : agriculture, feux de forêt, marché de l'énergie et transport maritime). En outre, les prévisions météorologiques permettent d'obtenir d'autres bénéfices environnementaux que nous n'avons pas pu quantifier, ainsi que des bénéfices économiques et sociaux considérables qui ne font pas partie du champ de la présente étude.

En ce qui concerne le CNES, le rapport réglementaire sur les émissions de GES établi en 2020 montre qu'en 2019, ses émissions **directes** se sont élevées à 10 818 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub><sup>127</sup>. Ces émissions sont principalement liées à la consommation de gaz au Centre spatial de Toulouse et représentent presque 17 % des émissions **totales** du bilan des émissions de GES du CNES. Les émissions indirectes associées à l'énergie produites par les activités du CNES (consommation d'électricité/de chaleur/de froid, transport et distribution) s'élèvent à 30 066 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>. Ces émissions sont principalement liées à la consommation d'électricité dans les locaux occupés par le CNES et aux émissions fugitives de méthane lors de la production d'électricité en Guyane, et représentent 47,5 % des émissions totales de GES du CNES. Les 35,5 % d'émissions restantes proviennent des déplacements domicile-travail et des déplacements professionnels des salariés, et auraient été émises même si le CNES n'avait pas existé puisque ces salariés auraient travaillé ailleurs. Toutefois, **nous ne pouvons pas évaluer précisément les émissions dues aux activités d'observation de la Terre.** Les émissions fugitives de méthane lors de la production d'électricité en Guyane étaient nécessaires pour pouvoir lancer des satellites d'observation, mais elles ne proviennent pas directement des activités d'observation de la Terre. Le même constat s'applique à l'utilisation d'électricité dans les locaux situés en France métropolitaine. Nous ne sommes pas en mesure d'évaluer la part de la consommation d'électricité

<sup>127</sup> Voir [https://cnes.fr/sites/default/files/drupal/202009/default/is\\_cnes\\_rapport\\_reglementaire\\_beges\\_2019\\_vdef.pdf](https://cnes.fr/sites/default/files/drupal/202009/default/is_cnes_rapport_reglementaire_beges_2019_vdef.pdf).

consacrée à l'observation de la Terre. Cependant, **à l'instar des activités de prévision météorologique, les activités d'observation de la Terre engendrent de nombreux impacts environnementaux positifs ainsi que des bénéfices économiques et sociaux susceptibles de compenser largement les émissions produites par ces activités.** De plus, les émissions totales de GES dues aux activités du CNES sont en diminution depuis 2011, avec une baisse de 13 % des émissions directes entre 2011 et 2019 et de 67 % des émissions indirectes associées à l'énergie (catégorie 2).

**L'observation de la Terre, comme les activités du CNES dans leur ensemble, implique d'envoyer des satellites dans l'espace, ce qui contribue à la pollution spatiale.** Celle-ci est en passe de devenir un problème mondial important car il y a actuellement dans l'espace 30 000 objets mesurant au moins 10 cm, y compris 1 400 satellites en service, 750 000 objets mesurant au moins 1 cm, et 135 millions d'objets mesurant au moins 1 mm<sup>128</sup>. Ces objets incluent, entre autres, des satellites désactivés, des étages supérieurs, des capots et des sangles, qui représentent la moitié des débris orbitaux connus. L'autre moitié est composée de fragments de toutes tailles dus à l'explosion d'étages de lanceurs ou de satellites. Ces objets se situent majoritairement dans les orbites basses (entre 700 et 1 000 km d'altitude) très utilisées pour l'observation de la Terre et la météorologie et dans l'orbite géostationnaire (36 000 km d'altitude), utile pour les télécommunications, la météorologie et la défense. La pollution spatiale peut causer deux problèmes majeurs :

- **En cas de collision en orbite, même un tout petit débris peut causer de gros dégâts.** Selon le CNES, un objet de 1 cm de diamètre aura la même énergie qu'une berline lancée à 130 km/h. Par conséquent, tout débris est dangereux pour les satellites fonctionnels et pour les astronautes. En 2015, la station spatiale internationale a dû manœuvrer cinq fois pour éviter des collisions avec des débris spatiaux.
- **Les débris finissent par retomber sur Terre.** Bien que la plupart se vaporise lors de leur rentrée atmosphérique, 10 à 20 % atteignent la surface du globe. Dans la majorité des cas, les impacts ont lieu dans des zones immergées de la Terre qui ne compte que 3 % de surface habitée, mais ils représentent tout de même un risque pour les populations et l'environnement.

**Le CNES ne contribue que partiellement à la pollution spatiale, et cette part est encore plus limitée lorsque seuls les satellites d'observation de la Terre sont pris en compte. Néanmoins, il s'emploie activement à chercher et à proposer des solutions à ce problème.** Par exemple, il a développé des outils de prévision de collisions en orbite, exploite le service CAESAR pour gérer de manière opérationnelle les risques de collision en orbite des satellites qu'il surveille, suit les rentrées atmosphériques présentant des risques et fournit aux autorités les prévisions de trajectoire de rentrée des débris.

---

<sup>128</sup> Source : <https://cnes.fr/fr/dossier-debris-spatiaux-ou-en-est>.

## Analyse des activités météorologiques et d'observation de la Terre au regard de la taxinomie de l'UE

La Commission européenne a lancé son plan d'action sur le financement de la croissance durable en mars 2018, à la suite des recommandations du groupe d'experts à haut niveau sur la finance durable. Les objectifs du plan d'action sont les suivants : i) réorienter les flux de capitaux vers des investissements durables, ii) gérer les risques financiers induits par le changement climatique, la dégradation de l'environnement et les problématiques sociales et iii) favoriser la transparence et une vision de long terme dans les activités économiques et financières<sup>129</sup>. Afin d'inscrire ce plan d'action dans un cadre législatif, la Commission a publié une proposition de règlement établissant, entre autres, un cadre pour promouvoir les investissements durables, connu sous le nom de « taxinomie de l'UE ». Après deux ans de négociations politiques et de consultations et la publication de recommandations par un groupe d'experts techniques sur la finance durable (TEG) mis en place par la Commission, les institutions européennes ont conclu un accord politique à la fin de l'année 2019, et le règlement sur la taxinomie a été adopté en juin 2020<sup>130</sup>.

La taxinomie européenne vise à déterminer si une activité économique peut être considérée comme « durable sur le plan environnemental » à l'aune de six objectifs environnementaux : a) l'atténuation du changement climatique ; b) l'adaptation au changement climatique ; c) l'utilisation durable et la protection des ressources aquatiques et marines ; d) la transition vers une économie circulaire ; e) la prévention et la réduction de la pollution ; f) la protection et la restauration de la biodiversité et des écosystèmes. Une activité économique sera réputée conforme à la taxinomie si elle respecte les quatre critères suivants : i) elle contribue de manière substantielle à au moins l'un des objectifs environnementaux, ii) elle ne cause pas de préjudice important à l'un quelconque des autres objectifs environnementaux (ou principe « DNSH »), iii) elle est exercée dans le respect des garanties sociales minimales et iv) elle respecte les critères d'examen technique établis dans les deux premiers critères (à savoir, contribution substantielle et principe DNSH). Dans ce contexte, la Commission a chargé le TEG d'élaborer, pour chaque activité à évaluer, des principes et des indicateurs liés à ces critères.

Une fois mise en application, la taxinomie obligera les acteurs financiers et non financiers à indiquer la part « verte » de leurs investissements, de leurs portefeuilles d'actifs (s'agissant des acteurs du marché financier) ou de leurs chiffres d'affaires, dépenses d'exploitation et dépenses d'investissement (s'agissant des sociétés non financières), sur le fondement de critères quantitatifs ou qualitatifs, ou les deux, tels qu'ils sont définis dans la taxinomie de l'UE. Ces critères sont définis dans des actes délégués. La Commission européenne a adopté en avril 2021 le premier acte délégué portant sur les deux objectifs climatiques<sup>131</sup> – atténuation du changement climatique et adaptation au changement climatique –, qui est entré en vigueur en décembre 2021 et est en application depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2022. Un autre acte délégué qui portera sur les quatre objectifs restants devrait être publié d'ici le milieu de l'année 2022, pour une entrée en application prévue en janvier 2023.

Les objectifs de l'OAT verte, dont la réalisation est évaluée dans la présente étude, sont l'atténuation du changement climatique, l'adaptation au changement climatique, la protection de la biodiversité et la réduction de la pollution. Ces objectifs coïncident en partie avec ceux de la taxinomie de l'UE. **Dans cette section, nous expliquons dans quelle mesure les activités météorologiques et d'observation de la Terre sont conformes à la taxinomie de l'UE**, eu égard aux deux premiers objectifs environnementaux qui font l'objet de l'acte délégué déjà publié : l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à celui-ci. Pour être en conformité avec la taxinomie, une activité doit, premièrement, être éligible, c'est-à-dire qu'elle doit être

<sup>129</sup> Source : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0097&from=FR>.

<sup>130</sup> Source : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852&from=FR>.

<sup>131</sup> Source : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32021R2139>.

référéncée dans la taxinomie, et, deuxièmement, être conforme, ce qui signifie qu'elle respecte les critères définis dans la taxinomie.

Compte tenu de l'absence de secteurs ou d'activités se rapportant à la météorologie ou à l'observation de la Terre dans l'acte délégué relatif au volet climatique de la taxinomie de l'UE, il était nécessaire de recenser des activités référencées dans la taxinomie proches de ces domaines et dont les critères d'éligibilité pouvaient être satisfaits par les organisations étudiées. Par conséquent, l'objectif poursuivi était de déterminer dans quelle mesure il était possible de démontrer l'éligibilité et la conformité des activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre à la taxinomie de l'UE, étant donné l'absence de secteurs dédiés dans le règlement européen.

L'absence de ces secteurs rend difficile l'établissement d'une corrélation entre les activités économiques référencées dans la taxinomie de l'UE et les activités des organisations étudiées (Météo-France, le CEPMMT, EUMETSAT, le CNES et l'ESA) car il n'est pas possible de se référer aux codes NACE desdites organisations<sup>132</sup>. L'établissement de cette corrélation est par conséquent fondé sur la description des activités économiques référencées dans la taxinomie. Il convient de noter que, sauf en ce qui concerne les rapports sur les OAT vertes, l'absence de ces secteurs dans la taxinomie n'est pas un problème pour les organisations étudiées, car elles ne sont pas obligées de déclarer leur conformité à la taxinomie.

#### A. Activités météorologiques

Les activités de Météo-France et du CEPMMT sont sensiblement similaires puisqu'elles consistent à produire des prévisions météorologiques et des projections climatiques, et à conduire des recherches pour améliorer la qualité de ces prévisions. Les activités d'EUMETSAT sont quelque peu différentes car cette organisation exploite des satellites et fournit des données d'observation. Néanmoins, ces données constituent une étape en amont de la chaîne de production des prévisions météorologiques ou climatiques, et contribuent donc, *via* les activités menées par Météo-France, le CEPMMT et d'autres services météorologiques nationaux en Europe, à l'atténuation du changement climatique et à l'adaptation à celui-ci.

Les activités de prévision météorologique et de projection climatique peuvent être décomposées en cinq tâches distinctes :

Tableau 5 : Classification des activités de prévision météorologique et de projection climatique

<b>Observation</b>	Tous les segments spatiaux (EUMETSAT) et segments sol (Météo-France, CEPMMT) servant à l'observation météorologique (satellites, stations, bouées, radiosondes, capteurs, etc.) sont utilisés pour recueillir et fournir des données qui seront exploitées au cours des étapes suivantes de la chaîne de production des prévisions.
<b>Modélisation et calcul pour la prévision météorologique</b>	À partir des observations réalisées, les météorologistes établissent des modélisations/simulations de l'évolution de l'atmosphère, à un moment donné, pour les prochaines heures et les prochains jours, au moyen de modèles implantés dans des supercalculateurs qui effectuent les calculs nécessaires (Météo-France et CEPMMT).
<b>Analyse des prévisions par les experts</b>	À l'aide de logiciels, les experts analysent les résultats issus des modèles et élaborent des cartes et des bulletins, transformant les scénarios de simulation en informations concrètes destinées aux utilisateurs. Ils assurent un contact direct avec certains utilisateurs (Météo-France et le CEPMMT).

<sup>132</sup> Le code NACE de Météo-France est O84.1.3 (Administration publique et défense ; sécurité sociale obligatoire), celui d'EUMETSAT et du CNES est M72 (Recherche-développement scientifique), celui de l'ESA est U99 (Activités des organisations et organismes extraterritoriaux). Ces codes NACE n'apparaissent pas dans la taxinomie car ces types d'organisations et leurs activités ne sont pas concernées par l'obligation de publication d'informations.

<b>Expertise et services climatiques</b>	Météo-France et le CEPMMT utilisent des modèles numériques avec des variables multiples représentant la planète entière (atmosphère, océan, glaces, etc.) et effectuent des simulations et des réanalyses en utilisant des supercalculateurs et des données climatiques (rendues exploitables par EUMETSAT) afin d'élaborer des scénarios climatiques. Ces scénarios peuvent être fournis à divers secteurs pour être utilisés dans le cadre de services opérationnels.
<b>Recherche</b>	Météo-France et le CEPMMT mènent des projets de recherche visant à améliorer notre compréhension de la planète et la qualité des prévisions météorologiques. Météo-France axe également ses recherches sur les projections concernant le changement climatique.

Source : réalisé par les auteurs

### i. Atténuation du changement climatique

**En ce qui concerne l'atténuation du changement climatique**, nous avons tout d'abord analysé le secteur « Information et communication » et l'activité « Solutions fondées sur des données en vue de réductions des émissions de GES<sup>133</sup> ». Météo-France, le CEPMMT et EUMETSAT utilisent des solutions fondées sur les technologies de l'information et de la communication (TIC), telles que les réseaux de stations spatiales et de stations de mesure au sol et d'autres équipements utilisés pour réaliser des observations, ainsi que des supercalculateurs permettant d'élaborer des modélisations. Les prévisions météorologiques peuvent contribuer à la réduction des émissions de GES dans la mesure où elles fournissent une aide précieuse à certains acteurs tels que les producteurs d'énergies renouvelables, ce qui promeut les énergies vertes sur le marché et favorise la réduction des émissions (comme nous l'avons déjà vu dans la partie intitulée « Développement des énergies solaire et éolienne »). Toutefois, les activités de prévision météorologique ne correspondent pas à la description de l'activité donnée dans la taxinomie, à savoir « l'élaboration ou l'utilisation de solutions TIC [...] ont pour objectif **principal** l'obtention de données et d'analyses permettant de réduire les émissions de GES ». Par conséquent, concernant l'atténuation du changement climatique, nous ne pouvons pas évaluer si ces organisations remplissent les conditions liées à cette activité.

Le même raisonnement s'applique au secteur « Activités spécialisées, scientifiques et techniques » pour l'activité « Recherche, développement et innovation proches du marché<sup>134</sup> ». La recherche conduite chez Météo-France et au CEPMMT vise à améliorer la qualité des prévisions météorologiques, ce qui *in fine* permettra de fournir un meilleur appui à divers secteurs, y compris les énergies renouvelables, et favorisera ainsi la transition verte vers les sources d'énergie décarbonée. Toutefois, les activités de recherche de ces deux organisations ne sont pas spécifiquement consacrées à la réduction des émissions de GES, mais à l'amélioration des prévisions et de notre compréhension du climat et de l'atmosphère. Par conséquent, là encore, nous ne pouvons pas évaluer si, pour cette activité, les conditions d'éligibilité à la taxinomie sont remplies.

Étant donné que les prévisions météorologiques requièrent l'utilisation de supercalculateurs pour conserver, manipuler et traiter des données, les activités de Météo-France et du CEPMMT peuvent être éligibles à l'activité « Traitement de données, hébergement et activités connexes<sup>135</sup> » du secteur « Information et communication ». Les critères de conformité pourraient également être remplis, pour autant que des informations suffisantes soient recueillies pour en attester.

<sup>133</sup> Activité 8.2 de l'acte délégué relatif à l'atténuation du changement climatique, qui peut être associée au code NACE J63.11.

<sup>134</sup> Activité 9.1 de l'acte délégué relatif à l'atténuation du changement climatique, qui peut être associée aux codes NACE M71.1.2 et M72.1.

<sup>135</sup> Activité 8.1 de l'acte délégué relatif à l'atténuation du changement climatique, qui peut être associée au code NACE J63.11.

## ii. *Adaptation au changement climatique*

**En ce qui concerne l'adaptation au changement climatique**, l'activité « Activités d'ingénierie et conseils techniques connexes consacrés à l'adaptation au changement climatique<sup>136</sup> » du secteur « Activités spécialisées, scientifiques et techniques » semble s'appliquer aux activités météorologiques. Les prévisions météorologiques ne sont pas spécifiquement centrées sur l'adaptation au changement climatique car les prévisions fournies sont saisonnières ou de court terme. Les activités de recherche ne sont pas des activités opérationnelles et ne peuvent pas être considérées comme des activités de conseils techniques. Toutefois, Météo-France fournit des services d'expertise climatique (en réalisant des simulations à longue échéance avec le CEPMMT et en exploitant des données fournies par EUMETSAT) dans des environnements opérationnels, notamment en fournissant un appui pour définir des politiques d'adaptation des territoires et de préservation de la biodiversité dans le contexte du changement climatique. Météo-France conçoit, produit et diffuse régulièrement des scénarios climatiques régionalisés afin de répondre aux demandes de l'État et des autorités locales. Nous pouvons donc affirmer sans difficultés que les services climatiques fournis par Météo-France (qui n'incluent pas la recherche climatique) sont éligibles car ils sont axés sur l'adaptation de nombreux secteurs au changement climatique.

### ▪ Contribution substantielle

Après avoir examiné si les services climatiques de Météo-France respectaient les critères de contribution substantielle, nous arrivons à la conclusion que, **si certains de ces critères paraissent effectivement remplis, l'évaluation de plusieurs d'entre eux n'est pas possible car elle requiert des informations qui ne sont pas disponibles** (voir l'exemple au paragraphe suivant). **Bien que nous ne soyons pas en mesure de déterminer si cette activité remplit les conditions de la taxinomie, nous décrivons les critères qui sont remplis et les difficultés constatées, afin de montrer dans quelle mesure Météo-France (avec les services fournis par le CEPMMT et EUMETSAT) pourrait être conforme aux critères de la taxinomie de l'UE.**

Le premier critère<sup>137</sup> exigeant que l'activité appuie d'autres activités économiques visant à l'adaptation au changement climatique est rempli par les services climatiques de Météo-France. En effet, ces services permettent de fournir un appui à d'autres activités économiques référencées dans la taxinomie afin que celles-ci remplissent leurs propres critères liés à l'adaptation (concernant, en particulier, la mise en œuvre de solutions physiques et non physiques réduisant substantiellement les risques climatiques physiques les plus importants pour cette activité). À titre d'exemple, Météo-France a fourni par le passé des services climatiques à l'appui d'activités de construction urbaine, consistant notamment à évaluer les conséquences des politiques d'urbanisme sur les températures dans les villes à l'aide d'une plateforme de modélisation permettant d'orienter les choix en matière de végétalisation des toits, d'élargissement des rues ou de réintroduction de la biodiversité (voir la partie intitulée **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Comme l'exige la taxinomie, Météo-France utilise les techniques de modélisation les plus récentes pour évaluer les risques liés au changement climatique (ces techniques permettent, par exemple, de fournir à la Sécurité civile des données sur l'évolution du risque de feux de forêt), modéliser l'évolution passée du climat et prévoir les scénarios possibles à l'avenir. De plus, Météo-France développe des modèles et des projections climatiques à l'aide des rapports du GIEC et des publications scientifiques à comité de lecture les plus récents. Météo-France contribue en outre à alimenter la recherche et les publications scientifiques et participe activement aux rapports du GIEC. Nous pouvons également affirmer que l'activité économique considérée supprime les obstacles à l'adaptation liés à l'information et aux capacités grâce aux services climatiques fournis, dont certains sont axés

<sup>136</sup> Activité 9.1 de l'acte délégué relatif à l'adaptation au changement climatique, qui peut être associée au code NACE 71.12.

<sup>137</sup> « L'activité économique vise principalement à fournir des services de conseil à l'appui d'une ou de plusieurs activités économiques pour lesquelles les critères d'examen technique ont été énoncés dans la présente annexe, en vue de satisfaire à ces critères respectifs et de contribuer de manière substantielle à l'adaptation au changement climatique, tout en satisfaisant aux critères pertinents dans le respect du principe consistant à ne pas causer de préjudice important à d'autres objectifs environnementaux. »

sur la mise en œuvre de mesures opérationnelles – par exemple, les portails et les applications web créés par Météo-France ou auxquels l'établissement contribue, tels que « Climat HD » ou « DRIAS, les futurs du climat » qui présentent des cartes de nombreux indicateurs climatiques, ainsi que des services climatiques conçus en collaboration avec des acteurs de différents secteurs pour aider ces derniers, comme cela est décrit plus haut pour les activités de construction. Ces services sont aujourd'hui plus accessibles grâce au Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique, auquel Météo-France contribue et dont il est fait mention dans la section intitulée « **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ». Cependant, nous ne disposons pas de suffisamment d'informations pour être en mesure de cartographier le potentiel de réduction des incidences matérielles dues aux risques climatiques dans d'autres activités économiques à l'aide d'une évaluation rigoureuse des risques climatiques dans ces autres activités. Nous ne pouvons pas non plus nous prononcer sur les éventuels impacts négatifs que pourraient avoir les solutions d'adaptation mises en œuvre grâce à Météo-France dans certaines activités économiques sur les efforts d'adaptation d'autres activités économiques, étant donné que Météo-France fournit de nombreux services à une multitude d'acteurs dans divers secteurs.

- Principe « Ne pas causer de préjudice important »

En ce qui concerne les critères liés au principe « DNSH », les activités relatives aux services climatiques ne sont pas exercées à de fins d'extraction ou de transport de combustibles fossiles. Les critères concernant l'utilisation durable et la protection des ressources aquatiques et marines ne s'appliquent pas aux activités de Météo-France car celles-ci ne sont pas de nature matérielle et n'ont donc pas d'incidences sur les masses d'eau. Nous justifions notre analyse par le fait que, dans un contexte plus large, l'activité de Météo-France n'est pas considérée comme causant un préjudice important à l'utilisation durable et à la protection des ressources aquatiques et marines au sens de l'article 17 du règlement sur la taxinomie<sup>138</sup> (voir l'annexe F). En effet, cette activité n'est pas préjudiciable au bon état ou au bon potentiel écologique des masses d'eau, y compris les eaux de surface et les eaux souterraines, ou au bon état écologique des eaux marines. S'agissant des autres objectifs environnementaux, la taxinomie ne requiert la conformité d'aucun critère au principe « DNSH ».

- Garanties sociales minimales

Enfin, nous ne disposons pas de suffisamment d'informations pour pouvoir vérifier le respect des garanties sociales. Toutefois, il ressort des rapports d'activité de Météo-France que l'établissement s'est engagé à développer des stratégies en faveur des responsabilités sociales, telles que l'égalité femme-homme. Ainsi, Claire Doubremelle, directrice adjointe de la recherche, a été nommée en 2019 en tant que référente à l'égalité professionnelle entre les femmes et les hommes, et, en s'appuyant sur un groupe de travail dédié, a établi un plan d'action en faveur de l'égalité professionnelle femme-homme à Météo-France<sup>139</sup>. Par ailleurs, étant donné que Météo-France est un établissement public et qu'il est situé en France, nous partons du principe qu'il respecte le droit du travail français ainsi que les droits de l'homme.

**Nous concluons qu'en raison d'un manque d'informations, il ne nous est pas possible d'évaluer la conformité à la taxinomie de l'UE. Cependant, l'analyse exposée ici tend à montrer que les services climatiques de Météo-France, étayés par les réanalyses du CEPMMT et les données fournies par EUMETSAT, sont éligibles et pourraient être conformes à la taxinomie de l'UE pour ce qui est de l'objectif d'adaptation au changement climatique.**

---

<sup>138</sup> Voir <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852&from=FR>.

<sup>139</sup> Voir le rapport d'activité 2019 de Météo-France : [http://bibliotheque.meteo.fr/exl-php/util/documents/accede\\_document.php?1631799307150](http://bibliotheque.meteo.fr/exl-php/util/documents/accede_document.php?1631799307150).



Nous avons ensuite examiné l'activité « Recherche, développement et innovation proches du marché<sup>140</sup> » qui fait elle aussi partie du secteur « Activités spécialisées, scientifiques et techniques ». Météo-France conduit des recherches dans les domaines de la prévision (les recherches réalisées avec le CEPMMT portant sur l'établissement de prévisions jusqu'à un an à l'avance) et du climat, en s'appuyant sur les produits d'observation d'EUMETSAT. Météo-France contribue de manière importante aux travaux du GIEC, en étroite collaboration avec ses partenaires de la communauté scientifique française (Cerfacs, IPSL, etc.) et à l'échelle internationale. L'importance de tous ces travaux est considérable pour mieux comprendre le changement climatique et s'y adapter. Ainsi, Météo-France élabore des produits (publications) qui, en définitive, contribuent à l'adaptation au changement climatique. Certains critères de contribution substantielle définis dans la taxinomie pour cette activité semblent s'appliquer, notamment le fait que l'activité économique supprime les obstacles à l'adaptation liés à l'information et aux capacités grâce à une meilleure connaissance du changement climatique, qui est essentielle pour trouver une solution à ce problème et faire prendre conscience de la nécessité de s'adapter à un climat qui évolue. Par exemple, le secteur de la construction commence à prendre en considération le réchauffement climatique et s'emploie à développer des bâtiments plus résilients qui pourraient considérablement diminuer les risques climatiques physiques les plus importants pour l'activité considérée (stress thermique, canicule, tempête, stress hydrique, variabilité des précipitations, etc.). Toutefois, la recherche conduite chez Météo-France ne respecte pas le quatrième critère défini dans la taxinomie, qui requiert que le produit des recherches (en l'espèce, la connaissance du changement climatique) soit utilisé dans un environnement opérationnel correspondant au minimum à un niveau de maturité technologique (NMT) de 7. La recherche sur la compréhension du climat et de la Terre conduite chez Météo-France appartient au domaine de la recherche fondamentale, qui ne s'applique pas directement à des environnements opérationnels mais qui offre des connaissances essentielles pour guider les décisions des acteurs publics et privés.

Par conséquent, nous ne pouvons pas conclure à la conformité de la recherche de Météo-France ni de la contribution d'EUMETSAT à la taxinomie de l'UE.

### *iii. Conclusions et recommandations*

À l'issue de cette analyse, nous concluons que **la taxinomie de l'UE ne couvre pas les activités météorologiques, dont les impacts sur l'atténuation et l'adaptation sont plutôt indirects, comme il ressort du présent rapport. Néanmoins, les services climatiques plus opérationnels fournis par Météo-France, avec l'appui en amont du CEPMMT et d'EUMETSAT, pourraient être conformes à la taxinomie, pour autant que des informations suffisantes soient recueillies pour en attester.**

Nos recommandations pour compléter et, ainsi, améliorer la taxinomie de l'UE eu égard aux activités météorologiques sont les suivantes :

- La taxinomie de l'UE couvre les secteurs économiques qui contribuent le plus aux émissions de GES dans l'Union européenne, de manière à valoriser les projets favorables à l'environnement permettant de réduire ces émissions. Les secteurs qui ne produisent pas nécessairement le plus d'émissions mais qui aident d'autres secteurs à réduire leurs impacts environnementaux, tels que le secteur météorologique, sont déjà pris en considération dans la taxinomie *via* les activités habilitantes, mais **ces activités et leurs critères devraient être davantage précisés et formulés en termes moins généraux**. À cet effet, les secteurs généraux figurant dans la taxinomie, comme « Information et communication », pourraient être divisés en activités plus spécifiques que celles qui existent actuellement. Par exemple, dans le rapport du TEG de 2019, une activité spécifique du secteur Information et communication, concernant la fourniture

<sup>140</sup> Activité 9.2 de l'acte délégué relatif à l'adaptation au changement climatique, qui peut être associée au code NACE M72.

d'applications spécialisées de télécommunications destinées à la surveillance et aux prévisions météorologiques, figurait dans la liste des activités concernées par l'adaptation au changement climatique. Pourtant, cette activité n'apparaît plus dans l'acte délégué, et l'activité plus générale qui y figure ne correspond pas aux activités de prévision météorologique.

- **La définition des critères d'éligibilité et de conformité devrait être plus ouverte aux activités « habilitantes » qui peuvent apporter indirectement des contributions importantes à l'environnement, sans pour autant y être dédiées.** Par exemple, les activités météorologiques ne sont pas éligibles à la taxinomie pour ce qui est de l'objectif d'atténuation du changement climatique car elles ne sont pas spécifiquement dédiées à la réduction des émissions de GES, bien qu'elles contribuent à ce que les énergies renouvelables soient viables, ce qui a des effets importants sur les émissions liées à l'énergie.
- Bien que la recherche soit incluse dans la taxinomie de l'UE, le critère de contribution substantielle lié à cette activité **exclue la recherche fondamentale.** Cette non-conformité est regrettable pour les activités météorologiques, en grande partie fondées sur l'amélioration constante des connaissances sur le climat, qui, même au stade de la recherche, sont essentielles pour guider les décisions de politiques publiques en matière d'adaptation au changement climatique (comme le montre l'utilisation des rapports du GIEC dans le cadre des COP).

## B. Activités d'observation de la Terre

Les activités de l'ESA et du CNES sont similaires, mais à des échelles différentes. L'ESA met en œuvre et coordonne les programmes spatiaux de ses États membres européens alors que le CNES représente la France au Conseil de l'ESA, afin que celle-ci prenne part aux décisions relatives aux programmes spatiaux, et coordonne les missions préparées par la France et l'industrie spatiale française. Le CNES peut participer directement à certaines missions exigeant un haut niveau de technologie. Par ailleurs, il relaie les besoins de la communauté scientifique et l'aide à exploiter les données d'observation de la Terre. EUMETSAT exploite des satellites météorologiques pour fournir, depuis l'espace, des observations de l'atmosphère et des océans aux services météorologiques nationaux et européens. Comme le montre l'analyse des activités de prévision météorologique ci-avant, EUMETSAT est considéré comme étant situé le plus en amont dans la chaîne de production de ces prévisions.

Les activités conduites par le CNES et l'ESA ne sont pas représentées dans les secteurs référencés dans la taxinomie de l'UE. Néanmoins, dans la présente section, nous examinons dans quelle mesure ces activités pourraient être éligibles et conformes à la taxinomie de l'UE, notamment en tant qu'activités habilitantes à l'appui d'autres secteurs. Les activités référencées dans la taxinomie qui ont déjà été analysées dans la partie sur les activités de prévision météorologique sont également examinées ici car elles paraissent être les plus pertinentes. **Bien que la production et la diffusion des données d'observation de la Terre soient des activités pouvant appuyer divers secteurs, nous allons voir que leur contribution à ces secteurs apparaît bien trop indirecte pour qu'elles puissent être considérées comme éligibles à la taxinomie de l'UE.**

### i. Atténuation du changement climatique

**En ce qui concerne l'atténuation du changement climatique,** les conclusions sont analogues à celles tirées de l'analyse des activités de prévision météorologique. L'analyse du secteur « Information et communication » et de l'activité « Solutions fondées sur des données en vue de réductions des émissions de GES » nous a paru pertinente, étant donné que les activités d'observation de la Terre requièrent l'utilisation de solutions TIC, telles que des satellites et des stations au sol. Toutefois, ces solutions ne sont pas spécifiquement dédiées à la réduction des émissions de GES comme cela est exigé dans la taxinomie (voir plus haut l'analyse des activités météorologiques). En outre, les données tirées de ces observations n'aident pas directement d'autres secteurs

à réduire leurs émissions de GES, mais contribuent en partie au développement de services opérationnels pouvant être utilisés pour réduire les émissions de GES dans divers secteurs (par exemple, les services destinés à optimiser les implantations géographiques d'installations de production d'énergies renouvelables). Par conséquent, les activités d'observation de la Terre ne sont pas éligibles à la taxonomie de l'UE au titre de l'activité susmentionnée.

Le secteur « Activités spécialisées, scientifiques et techniques » auquel est rattachée l'activité « Recherche, développement et innovation proches du marché » aurait également pu correspondre aux activités de l'ESA et du CNES, qui promeuvent de nombreux projets de recherche. Toutefois, la recherche conduite par le CNES et l'ESA vise à développer des solutions technologiques destinées à améliorer l'observation de la Terre et produire ainsi des données qui aideront la communauté scientifique ou à mettre au point des services opérationnels. Autrement dit, la recherche menée par ces organisations, même si elle est exploitée au niveau opérationnel (lancement et exploitation de satellites), ne permet pas directement à d'autres secteurs de réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub>.

**Par conséquent, s'agissant de l'atténuation du changement climatique, nous ne pouvons pas évaluer l'éligibilité des activités de l'ESA et du CNES à la taxinomie de l'UE.**

## *ii. Adaptation au changement climatique*

**En ce qui concerne l'adaptation au changement climatique**, le raisonnement est analogue à celui appliqué à l'atténuation du changement climatique. La contribution des activités d'observation de la Terre de l'ESA et du CNES est trop indirecte pour que ces activités soient éligibles à la taxinomie. Comme cela a été précédemment exposé, l'ESA et le CNES ont vocation à développer des programmes qui produisent des données, lesquelles contribuent à leur tour au développement de services opérationnels, mais l'ESA et le CNES ne produisent pas eux-mêmes ces services<sup>141</sup>. Il s'agit d'un point important, car même si les critères d'éligibilité définis dans la taxinomie prennent en compte les activités habilitantes qui appuient d'autres secteurs dans leur adaptation au changement climatique, les activités d'observation de la Terre ne font que contribuer au développement d'activités habilitantes. Les organisations qui utilisent des données spatiales pour créer des services opérationnels visant à aider d'autres secteurs pourraient, elles, être éligibles à la taxinomie de l'UE. Néanmoins, l'appui de l'ESA et du CNES peut s'avérer essentiel au développement de tels services opérationnels. Par exemple, le CNES propose la plateforme « Connect by CNES », et plus particulièrement le service « Lab'OT », conçu pour accompagner des start-up et d'autres acteurs souhaitant offrir des services fondés sur des données d'observation de la Terre. Le CNES facilite ainsi l'accès de ces derniers aux données et aux technologies qui sont essentielles pour leurs services.

Quant aux activités de recherche, le même argument déjà invoqué pour l'atténuation du changement climatique s'applique : la recherche conduite par le CNES et l'ESA vise à développer des solutions technologiques destinées à améliorer l'observation de la Terre et produire ainsi des données qui aideront la communauté scientifique, ou à mettre au point des services opérationnels. Autrement dit, la recherche menée par ces organisations, même si elle est exploitée au niveau opérationnel (lancement et exploitation de satellites), ne permet pas directement à d'autres secteurs d'adapter leurs activités au changement climatique.

**Par conséquent, s'agissant de l'adaptation au changement climatique, nous ne pouvons pas évaluer l'éligibilité, ni par conséquent la conformité, des activités de ces deux organisations à la taxinomie de l'UE.**

---

<sup>141</sup> Ces services sont développés par l'UE (services Copernicus), des sociétés privées, le CEPMMT, etc.

iii. *Conclusions et recommandations*

À l'issue de cette analyse, nous concluons que **la taxinomie de l'UE ne couvre pas les activités spatiales, qui, comme il ressort du présent rapport, ont des impacts très indirects sur l'atténuation et l'adaptation**, encore plus indirects que ceux des activités de prévision météorologique. Cependant, nous estimons que **les données spatiales sont nécessaires au développement de certains services opérationnels** qui aideront certains secteurs à réduire leurs émissions de GES ou à adapter leurs activités au changement climatique, et ainsi à respecter les critères de la taxinomie qui les concernent.

Le fait que la contribution de l'observation de la Terre se situe à un niveau trop en amont dans la chaîne de valeur ne rend pas cette activité moins essentielle pour autant, et nous recommandons, comme nous l'avons déjà fait dans notre analyse des activités de prévision météorologique, **que la définition des critères d'éligibilité et de conformité soit élargie pour inclure les activités susceptibles d'apporter indirectement des contributions importantes à l'environnement sans pour autant y être dédiées.**

## Conclusion générale

Le présent rapport visait à évaluer *ex post* les impacts environnementaux des activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre financées par des dépenses publiques françaises éligibles adossées aux OAT vertes. Plus précisément, ces dépenses financent cinq organisations – une partie des budgets de Météo-France et du CNES et les contributions annuelles de la France à trois organisations internationales, le CEPMMT, EUMETSAT et l'ESA. Les activités de ces organisations ont été spécialement examinées dans la présente évaluation au regard des quatre objectifs des OAT vertes définis par la France : l'atténuation du changement climatique, l'adaptation au changement climatique, la protection de la biodiversité et la réduction de la pollution. Dans le scénario contrefactuel caractérisé par l'absence de ces dépenses publiques, il apparaît clairement que les organisations nationales, à savoir Météo-France et le CNES, ne disposeraient pas des ressources suffisantes pour mener correctement leurs activités. En ce qui concerne les organisations européennes (CEPMMT, EUMETSAT et ESA), les entretiens ont montré que la participation financière, technique et scientifique de la France a joué un rôle déterminant dans le développement des activités d'observation de la Terre en Europe, ce qui nous a conduits à faire l'hypothèse d'un important retard de développement de ces activités dans le scénario contrefactuel. Les analyses que nous avons menées pour identifier les secteurs ayant subi des impacts et fournir des évaluations quantitatives ou qualitatives de ces impacts reposent sur la littérature scientifique, des études de cas, et des entretiens avec des experts et des représentants des organisations concernées. Les modèles que nous avons élaborés s'appuient sur des données fiables et des hypothèses explicites. Les résultats quantitatifs doivent être considérés avec prudence, car ils reposent sur des hypothèses incertaines. Ils fournissent cependant des ordres de grandeur des impacts environnementaux pouvant être attribués aux organisations concernées. De plus, il faut souligner que ces valeurs correspondent probablement à une fourchette basse, car elles reposent sur des hypothèses prudentes.

Les prévisions météorologiques et les projections climatiques sont essentielles dans de nombreux secteurs de l'économie et représentent de précieux outils d'information pour prévenir et réduire les impacts environnementaux négatifs résultant des activités humaines et des événements naturels. L'observation de la Terre est une activité qui contribue de manière notable à la production des prévisions météorologiques et des projections climatiques (en tant que première étape de la chaîne de prévision), en ce qu'elle fournit des données indispensables aux modèles de prévision numérique du temps. Cependant, le champ d'application des activités d'observation de la Terre est en réalité bien plus large. En Europe, le lancement de nombreuses missions et, plus récemment, du programme Copernicus a permis de mettre une multitude de données de grande qualité à la disposition de tous gratuitement. Ces données constituent une ressource inestimable pour la recherche environnementale, mais servent aussi (conjointement avec d'autres sources de données, des algorithmes, l'IA, etc.) à mettre au point des services opérationnels dans de nombreux secteurs, qui permettent de limiter voire de diminuer les impacts négatifs sur l'environnement.

Nous avons vu que les activités météorologiques nécessitent une consommation d'énergie importante qui produit des émissions de GES, en particulier du fait des supercalculateurs utilisés pour faire tourner les modèles de prévision numérique du temps, et que l'observation de la Terre pose un problème de pollution spatiale, avec des milliers de débris flottant dans l'espace. Les deux activités consomment aussi de l'énergie en raison des déplacements du personnel, du chauffage des locaux, etc. Cependant, Météo-France et le CNES s'efforcent d'atténuer leurs impacts en renforçant leur démarche écoresponsable en interne et comptent sur les progrès technologiques à venir (des supercalculateurs moins gourmands en énergie, par exemple). Par ailleurs, l'évaluation a mis en évidence, dans un large éventail de secteurs, une multitude d'impacts positifs indirects sur l'environnement qui, bien qu'ils ne soient pas tous quantifiés, dépassent largement les impacts négatifs résultant des activités météorologiques et d'observation de la Terre. Ces activités contribuent de

manière essentielle à nous renseigner sur le comportement, l'état et l'évolution de notre environnement – et ce dernier subit les conséquences des activités menées dans ces différents secteurs. Elles permettent ainsi aux responsables de prendre, en amont, des décisions mieux fondées et plus appropriées pour mettre en œuvre des mesures d'atténuation du changement climatique, d'adaptation au changement climatique, de réduction de la pollution et de protection de la biodiversité.

Plus précisément, les prévisions météorologiques contribuent à l'atténuation du changement climatique en favorisant l'optimisation des traitements agricoles, l'amélioration de la prévention et du contrôle des feux de forêt, la gestion des énergies solaire et éolienne ainsi que l'optimisation du routage des navires. L'observation de la Terre s'est également révélée prometteuse pour optimiser encore davantage les traitements agricoles, détecter et cartographier les feux de forêt et aider les pouvoirs publics à mettre en place une gestion et une protection plus efficaces des zones humides, toutes ces activités contribuant à l'atténuation du changement climatique. Pour ce qui est de l'adaptation au changement climatique, Météo-France fournit des projections et des services climatiques afin d'accompagner différents acteurs dans leurs efforts pour rendre les territoires plus résilients face au réchauffement climatique et à la multiplication des canicules. L'observation de la Terre, quant à elle, s'est révélée très utile pour surveiller l'érosion côtière et l'élévation du niveau des mers. Les prévisions météorologiques et l'observation de la Terre contribuent également à la protection de la biodiversité et à la réduction de la pollution, en particulier grâce à l'optimisation des traitements agricoles et de la gestion des feux de forêt, deux menaces importantes qui pèsent sur la faune et la flore. Ces activités sont également cruciales pour limiter les conséquences des épisodes de pollution atmosphérique et des pollutions marines (marées noires). Enfin, la contribution de ces activités à la recherche confère à ces dernières une valeur ajoutée importante. Celles-ci permettent en effet de faire progresser les connaissances scientifiques dans le domaine de l'environnement, en particulier sur le changement climatique, ces connaissances étant un outil essentiel pour aider les responsables politiques à mettre en œuvre des mesures appropriées d'atténuation du changement climatique, d'adaptation au changement climatique, de protection de la biodiversité et de réduction de la pollution.

La diversité des activités s'appuyant sur les prévisions météorologiques et l'observation de la Terre, déjà considérable, continue de croître. Il a donc été nécessaire de sélectionner les impacts à étudier, ce qui constitue une limite à la présente évaluation. De plus, l'accès libre et gratuit aux données de Copernicus a rendu difficile l'identification de tous les services utilisant ces données. Bien que les entretiens aient permis de confirmer que les principaux secteurs concernés avaient bien été pris en compte, la présente étude visait davantage à montrer l'ampleur et la diversité des bénéfices environnementaux obtenus grâce à l'existence de ces données qu'à établir une liste exhaustive de tous les services reposant sur ces données et de leurs impacts environnementaux. Il est donc probable que les activités de prévision météorologique et d'observation de la Terre produisent d'autres bénéfices environnementaux que ceux mentionnés dans ce rapport. De plus, l'évaluation n'a tenu compte que des missions Sentinel déjà opérationnelles. Nous pouvons aisément supposer que le lancement des prochaines missions de Copernicus (Sentinel-4, Sentinel-5 et Sentinel-6) dans les années à venir offrira aux prestataires de services et aux autorités compétentes des ressources et des évolutions techniques supplémentaires, et que les services fondés sur les données actuelles (missions Sentinel-1, Sentinel-2 et Sentinel-3) seront de plus en plus largement utilisés et performants. Il est également important de souligner que la présente évaluation ne porte que sur les impacts environnementaux, or les activités météorologiques et climatiques et l'observation de la Terre engendrent également un très grand nombre d'impacts socioéconomiques positifs, tels que la protection des infrastructures et des personnes.

En conclusion, nous n'avons pas été en mesure d'évaluer la conformité des activités météorologiques et climatiques et d'observation de la Terre à l'acte délégué relatif au volet climatique de la taxinomie de l'UE. Bien que ces activités et leurs impacts exposés en détail dans la présente évaluation semblent correspondre à ce que le document européen décrit comme des « activités habilitantes » (activités qui permettent

directement à d'autres activités de secteurs différents de contribuer à l'adaptation au changement climatique et à la mise en œuvre de mesures d'atténuation des émissions), elles ne répondent pas à l'ensemble des critères prescrits. Les deux raisons principales en sont que les prévisions météorologiques n'ont pas pour objectif spécifique la résolution d'un problème environnemental tel que la réduction des émissions, et que le rôle très indirect de l'observation de la Terre ne lui permet pas d'être considérée comme une « activité habilitante » au regard de la taxinomie de l'UE, mais plutôt comme une activité venant à l'appui d'une « activité habilitante » (c'est-à-dire une activité permettant de créer des services opérationnels fondés sur des données d'observation de la Terre). Pour ce qui est des projections climatiques, il apparaît que les services climatiques proposés par Météo-France constituent une activité qui semble être en conformité avec la taxinomie et qui pourrait satisfaire aux critères d'examen technique, pour autant que des informations suffisantes soient recueillies pour en attester.

Il pourra être intéressant de poursuivre l'analyse des activités météorologiques et d'observation de la Terre au regard du second acte délégué à venir, qui portera sur les quatre autres objectifs climatiques de la taxinomie de l'UE : l'utilisation durable et la protection des ressources aquatiques et marines, la transition vers une économie circulaire, la prévention et la réduction de la pollution, et la protection et la restauration de la biodiversité et des écosystèmes.

## Personnes ayant participé aux entretiens – remerciements

*Citizing remercie chaleureusement les personnes suivantes d'avoir bien voulu participer aux entretiens et consacrer du temps à partager leur expertise et leurs connaissances avec l'équipe d'évaluation :*

**Selma CHERCHALI** – Responsable du programme Sciences de la Terre (CNES)

**Paul COUNET** – Chef de la division Stratégie, communication et relations internationales (EUMETSAT)

**Laurent DUBUS** – Expert météo et climat (RTE)

**Maxime FORTIN** – Chargé de R-D, responsable du projet « Prévision court terme » (RTE)

**Aurélien GIRAULT et Manon COGNARD** – Commissariat général au développement durable (Ministère de la transition écologique)

**Umberto MODIGLIANI** – Directeur adjoint des prévisions (CEPMMT)

**Laurence MONNOYER-SMITH** – Directrice du développement durable et de la performance (CNES)

**Christophe MOREL** – Directeur de la stratégie (Météo-France)

**Thierry PINEAU et Olivier TOUSSAINT** – Direction générale de la recherche et de l'innovation (Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche)

**Toni TOLKER-NIELSEN** – Directeur des programmes d'observation de la Terre (ESA)

**Alexandre VINCENT** – Responsable OAT verte (Agence France Trésor)

*Nous remercions également les membres du Secrétariat et du Conseil d'évaluation pour leurs conseils et leur participation à l'étude.*



## Références bibliographiques

### Articles scientifiques et rapports

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). (mai 2012). Effets sanitaires liés à la pollution générée par les feux de végétation à l'air libre. État des connaissances relatif aux incendies de végétation, aux brûlages agricoles et aux brûlages des déchets verts de jardin. <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2010sa0183Ra.pdf>

Amin, J.V. (2009). Environment and Self Endangered Man. Page 29.

Barbosa, P.M, Gregoire, J-M., Cardoso Pereira, J.M. (1999). An Algorithm for Extracting Burned Areas from Time Series of AVHRR GAC Data Applied at a Continental Scale. Remote Sensing of Environment.

Bocard, C. (2006). Marées noires et sols pollués par des hydrocarbures. Enjeux environnementaux et traitement des pollutions. Éditions TECHNIP. IFP Publications. Page 108.

Bowditch, N. (2002). The American practical navigator. Part 8, Chapter 37 "Weather routing".

Christian CHATRY, Michel LE QUENTREC, Denis LAURENS, Jean-Yves LE GALLOU, Jean-Jacques LAFITTE, & Bertrand CREUCHET. (juillet 2010). Rapport de la mission interministérielle. Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts. <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/104000494.pdf>.

Christopher Johns. (septembre 2020). Wildfires, Greenhouse Gas Emissions and Climate Change. Strategic Analysis Paper. Future Directions International Pty Ltd. <https://www.futuredirections.org.au/wp-content/uploads/2020/09/FDI-Strategic-Analysis-Paper-Climate-Change-Carbon-and-Wildfires-FINAL.pdf>.

Citizing. (2017). An estimation of the expected socio-economic benefits arising from an increase of ECMWF supercomputer capacity.

Colson Daniel, George P. Petropoulos, Konstantinos P. Ferentinos. (2018). Exploring the Potential of Sentinels-1 & 2 of the Copernicus Mission in Support of Rapid and Cost-effective Wildfire Assessment. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.

Commission européenne. (mai 2020). COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU PARLEMENT EUROPÉEN, AU CONSEIL, AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN ET AU COMITÉ DES RÉGIONS - Une stratégie « de la ferme à la table » pour un système alimentaire équitable, sain et respectueux de l'environnement. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ea0f9f73-9ab2-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0002.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ea0f9f73-9ab2-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF).

Cosme, N., & Hauschild, M. Z. (2017). Characterization of waterborne nitrogen emissions for marine eutrophication modelling in life cycle impact assessment at the damage level and global scale. The International Journal of Life Cycle Assessment, 22(10), 1558-1570. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1271-5>.

Cros, Sylvain & Pinson, Pierre. (2018). Préviation météorologique pour les énergies renouvelables. La Météorologie, 100, Numéro Spécial Anniversaire 25 ans, p. 67-74.

Fearnleys. (2002). Review 2001. Fearnresearch, Oslo, Norway.

Giglio, L., Descloitres, J., O. Justice, C., J.Kaufman, Y. (2003). An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. Remote Sensing of Environment.

Giglio, L., Loboda, T., Roy, D.P., Quayle, B., O.Justice, C. (2009). An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*.

Gomes da Silva, P., Beck, A-L, Jara, M.s. (2020). Advances on coastal erosion assessment from satellite earth observations: exploring the use of Sentinel products along with very high resolution sensors.

Haddow George D., Jane A. Bullock, Damon P. Coppola. (2020). *Introduction to Emergency Management (Seventh Edition)*. Chapter 2 - Natural and Technological Hazards and Risk Assessment. Butterworth-Heinemann. Pages 33-84.

Haghighian Farshad, Saleh Yousefi, Saskia Keesstra. (2020). Identifying tree health using sentinel-2 images: a case study on Tortrix viridana L. infected oak trees in Western Iran. Geocarto International.

Helber Patrick, Benjamin Bischke, Andreas Dengel, Damian Borth. (2019). EuroSAT: A Novel Dataset and Deep Learning Benchmark for Land Use and Land Cover Classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.

Hope, C. (2015). The \$10 trillion value of better information about the transient climate response. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.

Hornero A., Hernández-Clemente R., Beck P. S. A., Navas-Cortés J. A., Zarco-Tejada P. J. (2018). Using Sentinel-2 Imagery to Track Changes Produced by Xylella Fastidiosa in Olive Trees. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. pp. 9060-9062.

IMO. (2000). *Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships*.

Iordache Marian-Daniel, Vasco Mantas, Elsa Baltazar, Klaas Pauly, Nicolas Lewyckyj. (2020). A Machine Learning Approach to Detecting Pine Wilt Disease Using Airborne Spectral Imagery. *Remote Sensing*.

Jean Pierre Vogel. (septembre 2019). RAPPORT D'INFORMATION sur la lutte contre les feux de forêts. Commission des finances. <http://www.senat.fr/rap/r18-739/r18-7391.pdf>.

Julie De Brux. (2016). Évaluation socio-économique du projet d'augmentation de puissance du supercalculateur de Météo-France. *Citizing*.

Julie De Brux, Alice Mével, Jincheng Ni, & Émile Quinet. (2018, juin). Évaluation socioéconomique de Météo-France. Rapport au ministre d'État, ministre de la transition écologique et solidaire. *France Stratégie et Citizing*.

Kaplan G., Avdan U. (2017). Mapping and monitoring wetlands using Sentinel-2 satellite imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.

Kussul Nataliia, Mykola Lavreniuk, Sergii Skakun, Andrii Shelestov. (2017). Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.

Laubier, L. (2004). La marée noire de l'Erika : conséquences écologiques et écotoxicologiques. *Natures Sciences Sociétés*. Volume 12. Pages 216 à 220.

Leviäkangas, P., & Hautala, R. (2009). Benefits and value of meteorological information services-the case of the Finnish Meteorological Institute. *Meteorological Applications*, 16(3), 369-379. <https://doi.org/10.1002/met.135>.

London Economics. (2015). Met Office – General Review. <https://londoneconomics.co.uk/wp-content/uploads/2016/03/MET-Office-General-Review-Final-Published.pdf>.

Ludwig Christina, Andreas Walli, Christian Schleicher, Jürgen Weichselbaum, Michael Riffler. (2019). A highly automated algorithm for wetland detection using multi-temporal optical satellite data. Remote Sensing of Environment.

Mahdianpari Masoud, Bahram Salehi, Fariba Mohammadimanesh, Saeid Homayouni, Eric Gill. (2018). The First Wetland Inventory Map of Newfoundland at a Spatial Resolution of 10 m Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data on the Google Earth Engine Cloud Computing Platform. Remote Sensing.

Mitri George, Manal Nader, Manale Abou Dagher, Karen Gebrael. (2020). Investigating the performance of sentinel-2A and Landsat 8 imagery in mapping shoreline changes. Journal of Coastal Conservation.

Ministère de la mer. (juillet 2020). Surveillance des pollutions en mer. Bilan annuel 2019. Rapport de la direction des affaires maritimes. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Bilan%20annuel%20de%20surveillance%20des%20pollutions%202019.pdf>.

Ministère de la transition écologique. (octobre 2012). Information CO2 des prestations de transport. Guide méthodologique. Pages 63-67. En partenariat avec l'ADEME et la MEDDE. [https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/86275\\_7715-guide-information-co2-transporteurs.pdf](https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/86275_7715-guide-information-co2-transporteurs.pdf).

Ministère de la transition écologique. (juin 2020). FEUX DE FORÊT : LES PRÉVENIR ET S'EN PROTÉGER.

Pekka Leviäkangas, Raine Hautala, Jukka Räsänen, Risto Öörni, Sanna Sonninen, Martti Hekkanen, & Mikael Ohlström. (2007). Benefits of meteorological services in Croatia. VTT Technical Research Centre of Finland. Finnish Meteorological Institute.

Pereira, J.M.C. (2003). Remote sensing of burned areas in tropical savannas. International Journal of Wildland Fire.

Phiri Darius, Matamy Simwanda, Serajis Salekin, Vincent Nyirenda, Yuji Murayama, Manjula Ranagalage. (2020). Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. Remote Sensing.

Pierre Pinson, Christophe Chevallier, George N. Kariniotakis. (2007). Trading Wind Generation From Short-Term Probabilistic Forecasts of Wind Power. IEEE Transactions on Power Systems.

D.P. Roy, Y. Jin, P.E. Lewis, C.O. Justice. (2005). Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. Remote Sensing of Environment.

RTE – Direction innovation et données. (janvier 2021). Bilan électrique 2020. [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020\\_0.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020_0.pdf).

RTE. (2020). Note : Précisions sur les bilans CO2 établis dans le bilan prévisionnel et les études associées. <https://www.concerte.fr/system/files/concertation/Note%20Bilans%20CO2%20V3.pdf>.

Slay C.M. (2011). A Review of Biodiversity and Land-Use Metrics, Indices, and Methodologies as Related to Agricultural Products - A Business Report for the Food, Beverage, and agriculture sector of the sustainability consortium. <https://saipatform.org/uploads/Library/Biodiversity%20and%20Land%20Use%20Business%20Report.pdf>.

Savci, S. (2012). Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. APCBEE Procedia, 1, 287-292. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.047>.

Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., A. Csiszar, I. (2014). The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. Remote Sensing of Environment.

Serge Collet. (novembre 2004). Facteurs d'émission de polluants de feux simulés de forêt et de décharge. Institut national de l'environnement industriel et des risques et Ademe. [https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Cr04\\_891e.pdf](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Cr04_891e.pdf).

The international shipping newspaper. (juillet 2010). Are weather services a storm in a teacup?

Vilén, T., & Fernandes, P. M. (2011). Forest Fires in Mediterranean Countries: CO2 Emissions and Mitigation Possibilities Through Prescribed Burning. Environmental Management, 48(3), 558-567. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9681-9>.

Mira Weirather, Gunter Zeug, Thomas Schneider. (2018). Automated Delineation Of Wildfire Areas Using Sentinel-2 Satellite Imagery. GI\_Forum.

Wong, P. P., Losada, I.J., Gattuso, JP., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., Sallenger, A. (2014). "Chapter 5: Coastal Systems and Low-Lying Areas". IPCC AR5 WG2 A 2014. pp. 361–409.

Yimei Wang, Yongqian Liu, Peng Song, Hui Liu, Zechun. (2019). Impact of the accuracy of NWP wind speed forecasts on wind power forecasting. 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2019.0312>.

## Bases de données

- Parties de la base de données de l'ADEME

[https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?pesticides\\_et\\_autres\\_produits.htm](https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?pesticides_et_autres_produits.htm)  
[https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD\\_DOC\\_FR/index.htm?engrais\\_et\\_composes\\_azotes.htm](https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?engrais_et_composes_azotes.htm)

- Base de données de RTE

<https://www.services-rte.com/fr/telechargez-les-donnees-publiees-par-rte.html?category=generation&type=forecasts>

- Base de données sur les incendies de forêt en France (BDIFF)

<https://bdiff.agriculture.gouv.fr/>

- Eurostat

[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/aei\\_fm\\_usefert/default/line?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/aei_fm_usefert/default/line?lang=en)

- Prométhée

[https://www.promethee.com/default/statistiques?selIndic=SUP&type=0&chkFrance=0&chkFrance=1&dtAlerteDeb=01%2F01%2F2014&codeg=&dtAlerteFin=31%2F12%2F2014&selDep=&txtHeureDe=&txtHeureA=&txtSMIn=&txtSMax=&coord\\_dfc=&cause=&origine=&btnSubmit=S%C3%A9lectionner+les+incendies](https://www.promethee.com/default/statistiques?selIndic=SUP&type=0&chkFrance=0&chkFrance=1&dtAlerteDeb=01%2F01%2F2014&codeg=&dtAlerteFin=31%2F12%2F2014&selDep=&txtHeureDe=&txtHeureA=&txtSMIn=&txtSMax=&coord_dfc=&cause=&origine=&btnSubmit=S%C3%A9lectionner+les+incendies)

- Union des industries de la protection des plantes (UIPP)

<https://www.uipp.org/app/uploads/2021/03/Nos-donnees-chiffrees.pdf>

## Autres sources d'informations et de données

La surface forestière - INVENTAIRE FORESTIER. (2019). Institut national de l'information géographique et forestière. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique11>.

Futura Sciences : <https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/incontournables-feux-foret-information-prevention-391/page/5/>.

Documents sur la taxinomie de l'UE :

- Acte délégué relatif à l'atténuation (2021)
- Acte délégué relatif à l'adaptation (2021)
- Règlement sur la taxinomie (2020)
- *Taxonomy Technical Report* (2019) (en anglais uniquement)

Sites web des organisations étudiées :

Météo-France : <https://meteofrance.fr/>

CEPMMT : <https://www.ecmwf.int/>

EUMETSAT : <https://www.eumetsat.int/>

CNES : <https://cnes.fr/fr>

ESA : [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/ESA\\_for\\_Earth](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/ESA_for_Earth)

## Annexes

### A. Liste des impacts identifiés des activités météorologiques et d'observation de la Terre

Tableau A1 : Liste finale des impacts environnementaux positifs identifiés des activités de prévision météorologique

Secteur	Action basée sur des prévisions à l'origine de l'impact	Mécanisme	Horizon temporel	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution
Énergie	Énergies éolienne et solaire plus fiables pour éviter les ajustements sur le marché	Prévisions météorologiques → production d'énergie éolienne et solaire plus prévisible → moins d'erreurs de prévision de l'approvisionnement en énergie → réduit la nécessité de combler l'écart entre l'offre et la demande par l'importation d'énergie, notamment d'énergie issue du charbon provenant d'Allemagne → moins d'émissions	Court et moyen terme	X			
	Incitation à investir dans les énergies éolienne et solaire	Prévisions météorologiques et projections climatiques (pour cartographier les zones particulièrement venteuses ou ensoleillées à l'avenir) → production d'énergie éolienne et solaire plus prévisible → moins de manquements aux engagements d'approvisionnement → secteurs plus rentables → incitation à investir dans ces secteurs → développement des énergies vertes aux dépens d'autres énergies polluantes → moins d'émissions	Court, moyen et long terme	X			
	Énergie hydraulique plus fiable	Tendances en matière de températures pour identifier les risques de sécheresse et d'inondation (par exemple à la suite de fortes chutes de neige) → optimisation du stockage et de l'utilisation de l'eau → secteur hydroélectrique plus efficient et fiable → l'énergie hydraulique peut être utilisée à la place d'autres sources d'énergie polluantes sur le marché → moins d'émissions	Saisonnier	X			
	Optimisation du lieu d'implantation des futurs barrages	Projections climatiques permettant de choisir de façon optimale le lieu d'implantation des barrages → efficacité des futurs barrages → fiabilité du secteur hydraulique à long terme malgré le changement climatique	Long terme		X		
	Prévision des zones qui seront contaminées en cas d'accident nucléaire	En cas d'accident nucléaire, prévisions météorologiques des précipitations et des vents pour mieux anticiper l'endroit où les particules radioactives retomberont → permet de prévoir où se situeront les zones contaminées	Court et moyen terme			X	X
	Arrêt des centrales nucléaires lors des canicules	Prévision des températures → permet d'anticiper les épisodes caniculaires → arrêt des centrales nucléaires si nécessaire → évite le rejet d'eau chaude dans les cours d'eau → l'eau chaude peut nuire à la faune et la flore qui n'y sont pas adaptées	Moyen terme et saisonnier			X	
Transport	Optimisation du routage des navires et du calendrier de navigation	Prévision des conditions météorologiques en mer (vent, tempêtes, pluie) → les opérateurs de navires anticipent et peuvent décider de rester au port ou de changer d'itinéraire → évite les détours → réduit la consommation superflue de carburant → réduit les émissions	Moyen terme	X			
	Réduction du risque d'accident maritime	Prévision des conditions météorologiques en mer (vagues, tempêtes, visibilité) → atténue le risque de collision avec d'autres navires et le risque	Moyen terme			X	X

Secteur	Action basée sur des prévisions à l'origine de l'impact	Mécanisme	Horizon temporel	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution
		que le navire chavire → évite la dispersion de débris de navires ou de produits polluants en mer → réduit le risque de pollution					
	Prévision de la dérive des nappes d'hydrocarbures en cas de déversement	En cas de déversement d'hydrocarbures, prévision de l'évolution des nappes en mer (étalement, évaporation, dispersion, ...) → aide à déterminer les meilleures stratégies d'intervention et méthodes de nettoyage à employer → atténue les impacts environnementaux sur la biodiversité	Moyen terme			X	X
	Gestion et planification optimales du salage en cas de chutes de neige	Prévision des épisodes neigeux et des zones verglacées → aide les autorités locales à décider où et quand saler les routes → évite une utilisation excessive de sel, néfaste pour la biodiversité (cours d'eau, flore, etc.)	Moyen terme			X	
	Réduction du risque d'embouteillage lors des épisodes neigeux	Prévision des épisodes neigeux → aide les autorités locales à avertir la population → les habitants peuvent anticiper et réduire leurs déplacements, et les autorités locales peuvent prendre des mesures pour déneiger les routes → réduit le risque d'embouteillage → réduit la pollution automobile causée par l'allongement des temps de trajet et la multiplication des arrêts	Moyen terme	X			X
<b>Agriculture</b>	Application d'engrais et de produits phytopharmaceutiques au moment le plus adéquat	Prévision des précipitations, du vent, des températures et de l'humidité → évite l'échec des traitements phytopharmaceutiques et fertilisants du fait de mauvaises conditions météorologiques → réduit la quantité d'engrais et de produits phytopharmaceutiques déversés dans la nature, ainsi que leur consommation superflue → trois impacts : 1) à efficacité égale, la quantité de produits utilisée est moindre, d'où une baisse de la production d'engrais et de produits phytopharmaceutiques, dont la fabrication produit beaucoup d'émissions ; 2) réduit la pollution de l'air, des sols et des cours d'eau ; 3) évite le phénomène d'eutrophisation, préjudiciable à la biodiversité	Court terme	X		X	X
	Gestion efficiente des cultures	Tendances en matière de températures et de précipitations → permet d'anticiper la disponibilité en eau à venir → adaptation en conséquence du choix des espèces cultivées → évite une surconsommation d'eau en cas de sécheresse grâce au choix de cultures moins gourmandes en eau → préservation des écosystèmes aquatiques	Saisonnier			X	
	Adaptation des cultures et de la gestion forestière au changement climatique	Meilleure connaissance du changement climatique → adaptation de l'agriculture et de la sylviculture au changement climatique grâce à des projets pilotes de recherche et opérationnels (ex. : développement de cultures moins consommatrices d'eau, boisement au moyen d'essences d'arbres moins inflammables) → meilleure préparation à la pénurie d'eau, à la multiplication des incendies, etc.	Long terme		X		
	Gestion efficiente de la coupe de fourrage pour	Prévisions météorologiques → meilleure anticipation de la gestion du fourrage → permet d'obtenir du fourrage de bonne qualité et en quantité suffisante pour les animaux (biodiversité domestique)	Court terme			X	

Secteur	Action basée sur des prévisions à l'origine de l'impact	Mécanisme	Horizon temporel	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution
	préserver le bien-être des animaux d'élevage						
	Anticipation des dangers météorologiques pour protéger les animaux d'élevage	Prévision des dangers météorologiques (inondations, vent, tempêtes, vagues de froid) → les éleveurs ont le temps de s'y préparer et de protéger leurs bêtes (biodiversité domestique)	Moyen terme			X	
<b>Urbanisme et planification urbaine</b>	Surveillance de la pollution de l'air pour prendre des mesures	Prévision de la pollution de l'air (en fonction des conditions météorologiques) → les autorités peuvent prendre des mesures telles que des restrictions de circulation ou la gratuité des transports en commun → aide à limiter la pollution et à la réduire	Court et moyen terme	X			X
	Meilleure gestion du chauffage collectif des bâtiments	Prévision des températures (notamment des vagues de froid) → les opérateurs des systèmes de chauffage collectif peuvent anticiper (ex. : s'il est prévu que la vague de froid ne dure que quelques jours et si la saison froide est encore loin, ils n'activent pas le chauffage) → évite de chauffer trop tôt → moins de consommation d'énergie → moins d'émissions	Moyen terme	X			
	Bâtiments adaptés à un climat plus chaud	Meilleure connaissance du réchauffement climatique → nouveaux bâtiments adaptés à un climat plus chaud pour plus de confort thermique (forme et orientation du bâtiment, meilleure isolation, etc.) → meilleure préparation au réchauffement climatique et réduction de la consommation d'énergie des habitants liée à la climatisation	Long terme	X	X		
	Meilleure planification des transports pour atténuer le réchauffement climatique	Meilleure connaissance du réchauffement climatique → montre la nécessité de réduire les émissions de GES → développement de modes de transport moins polluants (pistes cyclables, accroissement de l'offre de transports publics, etc.) → aide à réduire les émissions et la pollution	Long terme	X			X
	Mise au point de solutions pour lutter contre les îlots de chaleur	Meilleure connaissance du réchauffement climatique → les autorités s'efforcent de résoudre le problème des îlots de chaleur urbains (par l'implantation d'espaces verts, d'arbres, d'étendues d'eau, de toitures végétalisées, etc.) → aide à réduire la consommation d'énergie liée au refroidissement et les émissions de polluants atmosphériques (ozone)	Long terme	X	X		



Secteur	Action basée sur des prévisions à l'origine de l'impact	Mécanisme	Horizon temporel	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution
<b>Vigilance face aux événements naturels extrêmes</b>	Bonne préparation aux feux de forêt, prévention efficace de ces feux et prévision et cartographie des zones à haut risque d'incendie à long terme	Prévision de la chaleur, des précipitations, du vent et de l'humidité → informations utilisées pour mettre en œuvre des plans d'action contre les incendies (transferts d'hélicoptères, d'avions bombardiers d'eau, de pompiers et de matériel) et mieux maîtriser les incendies nouveaux et en cours (à l'aide des prévisions à court terme) et pour prendre des décisions stratégiques, comme positionner de manière anticipée des ressources dans les zones les plus critiques (à l'aide des prévisions à moyen terme) → limite la surface forestière brûlée et les conséquences des incendies (émissions et destruction de la biodiversité) Production de cartes des zones et des périodes à haut risque d'incendie → des mesures d'adaptation peuvent être prises (campagnes de sensibilisation dans ces zones, meilleure préparation et mise en place de ressources dans des lieux stratégiques, meilleure gestion des forêts en laissant de l'espace entre les arbres ou en installant des pare-feux par exemple, système d'assistance et de soutien à l'échelle européenne, etc.)	Court, moyen et long terme	X	X	X	X
	Prévision des crues pour réguler les barrages et atténuer les risques	Prévision des précipitations et des conditions hydrauliques → les exploitants de barrages anticipent mieux et régulent le stock d'eau en conséquence → peut contribuer à limiter les inondations à venir et à atténuer les risques de submersion ou de destruction des barrages → évite des conséquences catastrophiques sur la biodiversité en aval	Court et moyen terme			X	
	Avertissement du risque d'inondation pour que les produits toxiques soient mis en sécurité	Prévision des précipitations et des risques d'inondation pour donner l'alerte → des instructions sont données, notamment celle de protéger les produits toxiques des inondations → la population (produits domestiques) et les entreprises peuvent aider à éviter la pollution de l'environnement par libération de ces produits, laquelle nuirait à la biodiversité	Court et moyen terme			X	X
	Prévision des phénomènes El Niño particulièrement intenses pour anticiper les fortes inondations en Amérique	Prévision de l'intensité du phénomène El Niño → anticipation en Amérique (notamment en Guyane) des fortes précipitations, inondations et glissements de terrain pouvant survenir → peut aider la population à limiter les conséquences environnementales	Saisonnier			X	X
	Cartographie des risques d'inondation au fil du temps pour y être mieux préparés et améliorer les mesures de prévention	Projections climatiques → cartographie de l'évolution du risque d'inondation → réflexion pour se préparer à ces scénarios, mesures prises au niveau européen pour gérer les inondations dans des lieux stratégiques (création de zones humides, etc.) → aide à adapter les territoires où le risque d'inondation augmente avec le temps en raison du changement climatique	Long terme		X		
	Meilleure connaissance de l'élévation du niveau des mers pour prendre des mesures à long terme	Projections climatiques → prévision de l'élévation du niveau des mers → cartographie des zones qui seront submergées et où les cyclones causeront davantage d'inondations → aide à prendre des mesures de protection (digues, forêts côtières, évacuation progressive de la population, etc.)	Long terme		X		

Secteur	Action basée sur des prévisions à l'origine de l'impact	Mécanisme	Horizon temporel	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution
	Prévision de la durée des sécheresses pour une meilleure gestion de l'eau	Prévision des précipitations et des températures → alerte en cas de long épisode de sécheresse à venir → permet de prendre des mesures pour économiser l'eau et protéger les écosystèmes aquatiques (campagnes de sensibilisation, interdiction du remplissage des piscines, interdiction de l'irrigation un jour par semaine, etc.)	Moyen terme			X	
	Meilleure régulation des stocks d'eau en prévision des sécheresses	Tendances en matière de températures pour prévoir les risques de sécheresse → optimisation du stockage et de l'utilisation de l'eau → évite une consommation d'eau excessive → protection des écosystèmes aquatiques malgré l'épisode de sécheresse à venir	Saisonnier			X	
	Prévision des phénomènes El Niño particulièrement intenses pour anticiper les fortes sécheresses en Afrique (île de la Réunion, etc.)	Prévision de l'intensité du phénomène El Niño → anticipation des fortes sécheresses à venir à la Réunion et à Mayotte → peut aider à s'y préparer par une régulation plus efficiente des stocks d'eau et à protéger les écosystèmes aquatiques	Saisonnier			X	

Tableau A2 : Liste finale des impacts environnementaux négatifs identifiés des activités de prévision météorologique

Organisation	Action à l'origine de l'impact	Mécanisme	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution
<b>Météo-France</b>	Consommation d'énergie	Les activités de prévision météorologique nécessitent beaucoup d'énergie (ex. : fabrication et utilisation de supercalculateurs, consommation énergétique des infrastructures et des bâtiments, etc.).	X			
<b>CEPMET</b>	Consommation d'énergie	Les activités de prévision météorologique nécessitent beaucoup d'énergie (ex. : fabrication et utilisation de superordinateurs, consommation énergétique des infrastructures et des bâtiments, etc.).	X			
<b>EUMETSAT</b>	Consommation d'énergie	Les activités de fourniture de données d'observation nécessitent beaucoup d'énergie (ex. : consommation énergétique des infrastructures, des bâtiments, des systèmes de refroidissement, etc.).	X			

Tableau A3 : Exemples de services basés sur les données d'observation de la Terre de Copernicus et impacts environnementaux de ces services (liste non exhaustive)

Secteur	Service basé sur les données d'observation de la Terre	Impacts environnementaux	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution	Exemples de région utilisant ces services
Agriculture / pêche	Service de suivi des zones irriguées	Évite la surconsommation d'eau, surtout en période de sécheresse			X		Sud de l'Italie
	Services de suivi de la croissance et de la vigueur des cultures, des indices de végétation, de l'évolution de la biomasse, et de la consommation d'eau dans le temps et dans l'espace	Permet d'optimiser l'utilisation d'eau, de pesticides et d'engrais	X		X	X	Grèce, France, Belgique, Italie, Danemark, Suède, Afrique du Sud
	Service de suivi de l'utilisation des sols, des changements d'utilisation des sols et des pratiques en la matière	Facilite le contrôle des zones protégées en vertu de la directive « Habitats » (directive européenne)			X		Castille-León (Espagne)
	Service de suivi et de mesure de la densité des navires pour différents types d'embarcations, afin d'analyser les tendances	Permet de produire des séries temporelles de cartes de la densité des navires, qui reflètent les tendances en matière d'intensité de la pêche et de pollution potentielle. Aide à gérer et protéger durablement les eaux et les zones de pêche			X	X	Royaume-Uni
Sylviculture	Service de cartographie des espèces d'arbre et de réalisation d'un inventaire forestier	Aide à préserver et valoriser les espèces sous-exploitées actuellement mais adaptées au changement climatique et susceptibles de fournir des ressources à l'avenir		X			Alsace (France), avec les châtaigniers
	Services de suivi de la santé forestière par la détection et la cartographie des perturbations (incendies, maladies, sécheresses, etc.)	Améliore la prévision et l'élimination des perturbations grâce à une meilleure gestion forestière, ce qui permet d'accroître la capacité de capture des émissions mondiales de carbone (grâce à la préservation de la surface forestière) et de réduire les dommages écologiques (qualité de l'eau et de l'air, habitats, etc.)	X		X	X	Portugal, Royaume-Uni

Secteur	Service basé sur les données d'observation de la Terre	Impacts environnementaux	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution	Exemples de région utilisant ces services
	Service d'évaluation et de suivi des attributs des forêts de grande taille, avec un degré de précision suffisant	Aide à réaliser des inventaires forestiers à intervalles réguliers (évaluation des ressources), ce qui permet de détecter les changements notables dans les forêts et l'utilisation des sols, et contribue à mettre en œuvre une gestion forestière au service de la préservation de l'environnement			X		Portugal
Protection de la biodiversité et de l'environnement	Services permettant de déterminer l'étendue des zones brûlées et le degré de gravité des incendies	Meilleure gestion des mesures de restauration des écosystèmes à court terme et des mesures d'atténuation des conséquences des incendies (érosion des sols, etc.)			X		Espagne, Grèce
	Service de détection des marées noires, de leur localisation et de leur source	Contribue à éviter l'aggravation des catastrophes écologiques en permettant de donner l'alerte, de faciliter les opérations de nettoyage et d'identifier les pollueurs			X	X	Union européenne
	Services de cartographie et de suivi du déclin du biotope et des habitats dans des zones reculées et de la dégradation des prairies	Permet d'avoir connaissance du déclin et ainsi de tenter de le stopper ou de le ralentir au moyen de mesures de protection de la nature. La dégradation des prairies entraîne une baisse de qualité des services écosystémiques			X		Autriche, Lettonie, Italie
	Service de cartographie des performances des zones humides	Aide à cartographier les services écosystémiques, les priorités en matière de gestion de la conservation et les améliorations possibles en matière de gestion des ressources en eau			X		Bretagne (France)
Climat et eau	Service de fourniture de données et d'informations sur l'érosion côtière et de cartographie des utilisations possibles de l'estran pour réduire le risque d'inondation et d'érosion des côtes	Aide les décideurs et les gestionnaires à évaluer l'état des zones côtières régionales et à mettre en œuvre de meilleures solutions fondées sur la nature pour réduire le risque d'inondation et d'érosion des côtes		X			Pays-Bas, Espagne, Roumanie, Royaume-Uni

Secteur	Service basé sur les données d'observation de la Terre	Impacts environnementaux	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution	Exemples de région utilisant ces services
	Service de suivi des écosystèmes côtiers et des tendances d'érosion des côtes (communication de paramètres physiques et biogéochimiques)	Contribue à ce que les gestionnaires des zones côtières soient mieux informés des tendances d'érosion à court et long terme et des impacts attendus des aléas côtiers à venir, et optimisent ainsi leurs stratégies d'atténuation des risques		X	X		France (Nouvelle-Aquitaine)
	Service de suivi de l'efficacité de la restauration des tourbières	Aide à évaluer l'efficacité de la restauration, essentielle pour disposer de tourbières saines qui absorbent le CO <sub>2</sub> , réduisent les risques d'inondation et fournissent à la population une eau de grande qualité	X		X	X	Royaume-Uni (Yorkshire)
	Service de suivi du développement des énergies renouvelables et d'estimation de la source d'énergie renouvelable la mieux adaptée à une région (service COP4EE)	Permet d'estimer, pour une région donnée, quelle serait la source d'énergie renouvelable la plus efficace (solaire, éolien, biomasse, etc.), ce qui concourt à une transition énergétique plus pertinente, qui favorisera à long terme l'atténuation du changement climatique (grâce à une sélection optimale des sites)	X				Allemagne
Urbanisme et planification urbaine	Service de suivi des îlots de chaleur et des espaces verts dans les environnements urbains	Le service concernant le changement climatique et le service de surveillance terrestre de Copernicus fournissent des données collectées par les satellites Sentinel-2 qui apportent des informations sur les îlots de chaleur, l'évolution locale du climat, les changements d'utilisation des sols et les espaces verts urbains dans le but : - d'aider à la planification urbaine (utilisation des sols et infrastructures) ; - de localiser les zones sensibles contenant des îlots de chaleur urbains et d'identifier les zones manquant d'espaces verts pour adapter la planification urbaine et atténuer les îlots de chaleur. Les canicules entraînent une pollution importante (à l'ozone et aux particules) et une		X		X	France (Rennes), Espagne (Valence), République tchèque (Pilsen)

Secteur	Service basé sur les données d'observation de la Terre	Impacts environnementaux	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution	Exemples de région utilisant ces services
		meilleure planification urbaine rendrait les villes plus résilientes face au changement climatique.					
	Service de surveillance de la pollution de l'air	Le service de surveillance de l'atmosphère de Copernicus permet de réaliser un suivi de la pollution de l'air en Europe pour prendre les mesures adéquates -> réduction de la pollution				X	Europe

## B. Méthode de notation employée pour la sélection des impacts des activités de prévision météorologique

En raison du nombre élevé d'impacts et du temps limité dont nous disposons pour effectuer l'évaluation, il a été nécessaire de sélectionner ces impacts de manière pragmatique.

Nous proposons dans la présente annexe une méthode qualitative permettant de classer les impacts par ordre d'importance.

**Une note d'importance a été attribuée** à chaque action basée sur des prévisions météorologiques susceptible d'avoir un impact environnemental **afin de classer ces actions et d'opérer une sélection**. Il est à noter que ce classement ne concerne que les impacts environnementaux positifs découlant d'actions menées dans divers secteurs en ayant recours à des prévisions météorologiques ou des projections climatiques. En revanche, les impacts négatifs identifiés n'ont pas été inclus dans le classement, car ils ne sont pas comparables aux impacts positifs identifiés. En effet, ils ne découlent pas d'actions menées dans divers secteurs en ayant recours à des prévisions météorologiques, mais sont liés aux activités des organisations météorologiques elles-mêmes (consommation d'énergie des infrastructures de Météo-France, etc.). Le système de classement décrit ci-après ne leur est donc pas applicable. Toutefois, puisqu'ils ne sont pas nombreux (trois impacts seulement) et que leur sélection permet de prendre en considération les effets néfastes de ces activités, et pas uniquement leurs bénéfiques, les impacts négatifs ont été retenus d'office et figurent dans l'évaluation.

S'agissant des impacts positifs et indirects, le classement par ordre d'importance repose sur deux critères : **l'ampleur et la fréquence**. Pour chacune des actions, une note de -1, 0 ou +1 est attribuée à chaque critère selon certaines règles (voir encadré ci-dessous).

### Description des critères de sélection

Deux critères sont pris en compte pour évaluer l'importance des impacts :

#### 1) l'ampleur

- ❖ **Définition** : l'action menée par les parties prenantes (en ayant recours à des prévisions météorologiques ou des projections climatiques) a-t-elle un impact nul, modéré ou fort sur l'environnement (en matière d'atténuation, d'adaptation, de pollution ou de biodiversité) ?
- ❖ **Notation** :
  - +1 = l'action a un fort impact environnemental
  - 0 = l'action a un impact environnemental, mais plus modéré
  - -1 = l'action n'a pas d'impact environnemental ou a un impact très faible

#### 2) la fréquence

- ❖ **Définition** : à quelle fréquence les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont-elles utilisées pour mener l'action à l'origine de l'impact dans les secteurs concernés ?
- ❖ **Notation** :
  - +1 = fréquemment (tous les jours ou toutes les semaines)
  - 0 = quelquefois (chaque saison ou chaque année)
  - -1 = rarement (de manière occasionnelle ou seulement en cas d'événement majeur)

Une fois qu'une note d'ampleur et une note de fréquence ont été attribuées à un impact, ces deux notes sont additionnées pour obtenir la note finale, qui indique le degré d'importance de l'impact. On obtient alors différentes situations, décrites dans le tableau qui suit.

Systeme de notation employé pour classer les actions basées sur des prévisions météorologiques ou des projections climatiques et susceptibles d'avoir un impact environnemental

Ampleur Fréquence	-1	0	+1
-1	<b>Note attribuée à l'impact : -2</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont utilisées <b>de manière occasionnelle</b> pour mener des actions n'ayant <b>pas d'impact environnemental</b> ou ayant un <b>impact très faible</b> .	<b>Note attribuée à l'impact : -1</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont utilisées <b>de manière occasionnelle</b> pour mener des actions ayant un impact environnemental <b>modéré</b> .	<b>Note attribuée à l'impact : 0</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont utilisées <b>de manière occasionnelle</b> pour mener des actions ayant un <b>fort impact environnemental</b> .
0	<b>Note attribuée à l'impact : -1</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont <b>quelquefois</b> utilisées pour mener des actions n'ayant <b>pas d'impact environnemental</b> ou ayant un <b>impact très faible</b> .	<b>Note attribuée à l'impact : 0</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont <b>quelquefois</b> utilisées pour mener des actions ayant un impact environnemental <b>modéré</b> .	<b>Note attribuée à l'impact : +1</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont <b>quelquefois</b> utilisées pour mener des actions ayant un <b>fort impact environnemental</b> .
+1	<b>Note attribuée à l'impact : 0</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont <b>fréquemment</b> utilisées pour mener des actions n'ayant <b>pas d'impact environnemental</b> ou ayant un <b>impact très faible</b> .	<b>Note attribuée à l'impact : +1</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont <b>fréquemment</b> utilisées pour mener des actions ayant un impact environnemental <b>modéré</b> .	<b>Note attribuée à l'impact : +2</b> Les prévisions météorologiques ou projections climatiques sont <b>fréquemment</b> utilisées pour mener des actions ayant un <b>fort impact environnemental</b> .

Bien que tous les impacts méritent d'être étudiés, nous avons décidé de centrer notre attention sur ceux ayant obtenu une note finale de +2 et d'en retenir également certains notés +1 (en vert dans le tableau ci-dessus). Ainsi, la liste des impacts environnementaux positifs indirects se réduit à dix impacts découlant de cinq actions basées sur des prévisions météorologiques et ayant un impact environnemental modéré ou fort dans au moins un domaine. Nous avons choisi de retenir également certains impacts notés +1 pour traiter d'autres thématiques intéressantes, compte tenu du temps qu'il nous restait pour les étudier.

Avant de présenter les résultats de ce protocole, nous allons donner quelques exemples de notation.

### 1<sup>er</sup> cas : prévision des zones qui seront contaminées en cas d'accident nucléaire (note d'importance : -2)

Les autorités publiques utilisent les prévisions météorologiques en cas d'accident nucléaire, car les particules radioactives sont alors libérées dans l'atmosphère et retomberont au sol en cas de pluie. Les prévisions permettent donc d'anticiper la trajectoire de ces particules (essentiellement grâce aux prévisions de vent) et les zones risquant d'être exposées (à l'aide des prévisions de pluie).

- **Ampleur = -1** → Les autorités utilisent les prévisions pour savoir quelles seront les zones contaminées, mais se servent de ces informations surtout pour protéger la population et procéder à des évacuations. Les actions menées n'empêchent pas la contamination de la biodiversité. Elles n'ont donc aucun impact environnemental.
- **Fréquence = -1** → L'utilisation des prévisions météorologiques pour mener de telles actions est très rare, car les accidents nucléaires sont exceptionnels.

### 2<sup>e</sup> cas : bâtiments adaptés à un climat plus chaud (note d'importance : 0)

Les acteurs du BTP utilisent les connaissances sur le réchauffement climatique issues des projections climatiques que le GIEC a réalisées en s'appuyant sur les activités météorologiques. Comme nous le savons tous, il est très probable que le changement climatique entraîne de plus en plus d'épisodes caniculaires, y compris en France. Le secteur du BTP devra donc s'adapter et tenir compte de ce facteur au moment de la construction de nouveaux bâtiments. Il existe déjà des techniques pour adapter les nouveaux bâtiments aux températures élevées et ainsi apporter plus de confort thermique aux futurs résidents (forme et orientation du bâtiment, meilleure isolation, etc.). Cela permettra d'être



mieux préparés au réchauffement climatique, mais aussi de réduire la consommation d'énergie des habitants liée à la climatisation, donc de diminuer les émissions et ainsi atténuer le réchauffement climatique.

- **Ampleur = +1** → L'action consistant à construire des bâtiments plus adaptés à la chaleur est assez importante pour l'adaptation au changement climatique, en particulier dans les villes où le confort thermique des habitants se dégrade de plus en plus en été, ce qui entraîne une surconsommation d'énergie pour rafraîchir les logements.
- **Fréquence = -1** → Jusqu'à présent, les connaissances sur le réchauffement climatique ont été peu exploitées pour construire des bâtiments adaptés au changement climatique. Avec l'instauration de nouvelles règles, par exemple la réglementation environnementale RE2020 entrant en vigueur cette année, cet aspect sera de plus en plus pris en compte dans les futurs projets de construction. Néanmoins, puisque notre évaluation est de type *ex post*, nous retenons que, ces dernières années, l'utilisation de telles projections climatiques pour la conception de nouveaux bâtiments est restée rare.

### **3<sup>e</sup> cas : meilleure gestion du chauffage collectif des bâtiments (note d'importance : 0)**

Les syndicats de copropriété utilisent les prévisions météorologiques à court et moyen terme pour anticiper les vagues de froid et l'arrivée de l'hiver afin d'activer le chauffage collectif dans les bâtiments au bon moment (et le désactiver au début de la période estivale). Cette optimisation évite de rallumer le système de chauffage trop tôt dans l'année (par exemple au moment d'une vague de froid temporaire) et permet donc des économies d'énergie et une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

- **Ampleur = 0** → Le moment où l'action est menée dépend des prévisions météorologiques et permet d'éviter une consommation d'énergie superflue résultant d'un allumage trop précoce du chauffage (par exemple si la vague de froid ne dure que quelques jours). Cette action a donc un impact environnemental, puisque le chauffage nécessite de l'énergie dont la production est source d'émissions. Toutefois, nous estimons que cet impact est modéré, car l'action ne concerne que les bâtiments dotés d'un système de chauffage collectif (ce qui n'est pas le cas le plus fréquent en France) et ne s'applique que sur une courte durée (de quelques jours à une ou deux semaines ; si la vague de froid dure plus longtemps, le chauffage est généralement rallumé).
- **Fréquence = 0** → L'utilisation des prévisions météorologiques pour mener des actions telles que rallumer le chauffage collectif se fait généralement de manière saisonnière (deux fois par an : en automne et au printemps).

### **4<sup>e</sup> cas : application d'engrais et de produits phytopharmaceutiques au moment le plus adéquat (note d'importance : +2)**

Les agriculteurs utilisent les prévisions météorologiques pour choisir le meilleur moment où appliquer les produits phytopharmaceutiques et les engrais. Sans ces prévisions, de nombreux traitements seraient rapidement emportés par le vent ou la pluie dans les eaux de surface ou les eaux souterraines, ce qui aurait de multiples conséquences : pollution des sols, de l'air et de l'eau, risque d'atteinte à la biodiversité, et gaspillage de produits dont la fabrication entraîne l'émission de grandes quantités de GES.

- **Ampleur = +1** → Fort impact environnemental, car l'efficacité des actions menées par les agriculteurs dépend grandement des conditions météorologiques, et les prévisions sont essentielles pour optimiser les traitements et éviter ainsi à coup sûr des impacts négatifs considérables sur l'environnement (pollution, atteinte à la biodiversité).
- **Fréquence = +1** → L'utilisation des prévisions météorologiques est fréquente, car les agriculteurs appliquent des traitements tout au long de l'année.

Nous avons appliqué cette méthode à toutes les actions identifiées et avons ainsi obtenu une sélection plus restreinte. Les résultats sont présentés dans le tableau figurant à la page suivante. Veuillez noter que les actions indiquées dans la deuxième colonne sont nommées sous une forme abrégée, qui ne se veut pas une description exhaustive. Pour en savoir plus sur les mécanismes, voir l'[annexe A](#). La dernière colonne contient la note finale, ainsi que la note de chaque critère entre parenthèses. Par exemple, pour le premier impact, l'ampleur est notée +1 et la fréquence +1, ce qui conduit à une note d'importance finale de +2.

Les impacts dont la note est sur fond jaune ou orange ont été exclus du champ de cette étude, ainsi que certains impacts notés +1. Cela ne signifie pas – précisons-le – que ces impacts n’ont aucune importance ou n’existent pas, mais des choix ont dû être faits en raison du manque de temps pour tous les traiter.

## Résultats de la méthode de notation employée pour classer par ordre d'importance les impacts environnementaux des activités de prévision météorologique et de projection climatique

Secteur	Action basée sur des prévisions/projections et susceptible d'avoir un impact environnemental	Atténuation	Adaptation	Biodiversité	Pollution	Note d'importance (ampleur, fréquence)
Énergie	<b>Énergies éolienne et solaire plus fiables pour éviter les ajustements sur le marché</b>	X				+2 (+1, +1)
	<b>Incitation à investir dans les énergies éolienne et solaire</b>	X				+2 (+1, +1)
	Énergie hydraulique plus fiable	X				0 (0, 0)
	Optimisation du lieu d'implantation des futurs barrages		X			0 (+1, -1)
	Prévision des zones qui seront contaminées en cas d'accident nucléaire			X	X	-2 (-1, -1)
	<b>Arrêt des centrales nucléaires lors des canicules</b>			X		+1 (+1, 0)
Transport	<b>Optimisation du routage des navires et du calendrier de navigation</b>	X				+2 (+1, +1)
	<b>Réduction du risque d'accident maritime</b>			X	X	+1 (0, +1)
	<b>Prévision de la dérive des nappes d'hydrocarbures en cas de déversement</b>			X	X	+1 (0, +1)
	Gestion et planification optimales du salage en cas de chutes de neige			X		0 (0, 0)
	Réduction du risque d'embouteillage lors des épisodes neigeux	X			X	-1 (-1, 0)
Agriculture	<b>Application d'engrais et de produits phytopharmaceutiques au moment le plus adéquat</b>	X		X	X	+2 (+1, +1)
	<b>Gestion efficace des cultures</b>			X		+1 (+1, 0)
	<b>Adaptation des cultures et de la gestion forestière au changement climatique</b>		X			+1 (+1, 0)
	Gestion efficace de la coupe de fourrage pour préserver le bien-être des animaux d'élevage			X		0 (0, 0)
	<b>Anticipation des dangers météorologiques pour protéger les animaux d'élevage</b>			X		+1 (+1, 0)
Urbanisme et planification urbaine	<b>Surveillance de la pollution de l'air pour prendre des mesures</b>	X			X	+1 (+1, 0)
	Meilleure gestion du chauffage collectif des bâtiments	X				0 (0, 0)
	Bâtiments adaptés à un climat plus chaud	X	X			0 (+1, -1)
	<b>Meilleure planification des transports pour atténuer le réchauffement climatique</b>	X			X	+1 (+1, 0)
Vigilance face aux événements naturels extrêmes	<b>Mise au point de solutions pour lutter contre les îlots de chaleur</b>	X	X			+1 (+1, 0)
	<b>Bonne préparation aux feux de forêt et prévention efficace de ces feux (y compris à long terme)</b>	X	X	X	X	+2 (+1, +1)
	<b>Prévision des crues pour réguler les barrages et atténuer les risques</b>			X		+1 (+1, 0)
	Avertissement du risque d'inondation pour que les produits toxiques soient mis en sécurité			X	X	0 (0, 0)
	Prévision des phénomènes El Niño particulièrement intenses pour anticiper les fortes inondations en Amérique			X	X	-2 (-1, -1)
	<b>Cartographie des risques d'inondation au fil du temps pour y être mieux préparés et améliorer les mesures de prévention</b>		X			+1 (+1, 0)
	Meilleure connaissance de l'élévation du niveau des mers pour prendre des mesures à long terme		X			0 (+1, -1)

<b>Prévision de la durée des sécheresses pour une meilleure gestion de l'eau</b>			X		+1 (+1, 0)
Meilleure régulation des stocks d'eau en prévision des sécheresses			X		0 (0, 0)
Prévision des phénomènes El Niño particulièrement intenses pour anticiper les fortes sécheresses en Afrique (île de la Réunion, etc.)			X		-1 (0, -1)

## C. Méthodes utilisées pour quantifier les impacts

### Annexe C.1 : Réduction des émissions de GES résultant de l'optimisation des traitements agricoles grâce à l'utilisation des prévisions météorologiques

Aucune étude n'a été publiée au sujet des économies d'engrais et de produits phytopharmaceutiques pouvant être réalisées grâce à l'optimisation du calendrier d'application des traitements au regard des conditions météorologiques. Toutefois, d'après les spécialistes interrogés lors de précédentes missions de *Citizing* (trois entretiens avec des agriculteurs, un avec une coopérative agricole régionale ayant constitué un centre d'études techniques agricoles et un avec l'institut technique Arvalis), **la part des traitements se soldant par un échec se situerait entre 1 % et 5 % (en poids)**. Pour éviter de surestimer l'impact, **nous avons considéré que 5 % des traitements échouaient**. Cette hypothèse doit être prise avec précaution, car elle repose sur un petit échantillon. Cependant, **elle permet d'avoir un ordre de grandeur de la quantité de traitements qui échouent malgré la qualité du service de prévision météorologique actuellement fourni par Météo-France**.

Pour ce qui est du contrefactuel, il est impossible de déterminer combien de traitements échoueraient si les agriculteurs n'avaient pas accès aux prévisions météorologiques locales. On peut supposer qu'ils s'appuieraient sur les tendances générales et profiteraient des périodes généralement ensoleillées ou pluvieuses dans la région, pendant lesquelles le risque de changement de temps imprévu est faible. Ces périodes ne sont toutefois pas si fréquentes et on observe le plus souvent une certaine hétérogénéité au sein de chaque région, même dans une zone de 27 km sur 27 km. Les agriculteurs pourraient aussi s'appuyer sur les prévisions de températures, car elles ne varient pas beaucoup dans une zone de cette taille (sauf dans les régions montagneuses, où elles dépendent de l'exposition au soleil et d'autres facteurs). Par ailleurs, les agriculteurs pourraient mettre au point des solutions de suivi de l'humidité des sols. Ils seraient néanmoins confrontés au manque de prévisions locales fiables de la vitesse du vent et des conditions hygrométriques, essentielles à l'efficacité des traitements mais impossibles à réaliser pour des zones très ciblées dans le scénario contrefactuel. Il est donc probable que deux fois plus de traitements au moins échoueraient. Pour mettre les impacts environnementaux en perspective, nous avons cherché à évaluer leur ampleur en partant de l'hypothèse qu'**entre 10 % et 30 % des traitements échoueraient en l'absence de prévisions météorologiques locales**. Bien que ces chiffres puissent être débattus, il est peu probable qu'il s'agisse d'une surestimation étant donné les éléments exposés ci-avant, en particulier s'agissant de l'absence de prévisions locales de la vitesse du vent.

Nous avons estimé la différence entre les volumes de produits phytopharmaceutiques et d'engrais gaspillés de 2016 à 2019 dans la situation existante et ceux gaspillés dans le scénario contrefactuel, sur la base de la consommation de ces produits en France pendant cette période, et en avons déduit la moyenne annuelle. Les volumes de produits phytopharmaceutiques consommés en France<sup>142</sup> sont issus d'une association française spécialisée dans la protection des plantes<sup>143</sup>. Les volumes d'engrais consommés<sup>144</sup> proviennent de la banque de données Eurostat. Toutefois, seules des données sur l'azote et le phosphore étaient disponibles. Nous avons donc décidé d'exclure de l'analyse les produits à base de potassium, ce qui ne devrait pas compromettre la représentativité car la France consomme essentiellement des produits azotés.

Les produits phytopharmaceutiques et les engrais sont une source assez importante d'émissions au moment de leur fabrication et après leur épandage. Nous avons cherché à mesurer la différence d'émissions entre la situation existante et le scénario contrefactuel, pour évaluer l'impact (à efficacité constante) de la baisse du nombre de traitements inefficaces. Nous avons utilisé la banque de données de l'Ademe<sup>145</sup> pour connaître la valeur des facteurs d'émissions de ces produits. En ce qui concerne les produits phytopharmaceutiques, la banque de données indique les facteurs d'émissions sur la totalité du cycle de vie (en kg de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O par kg de produit). Pour ce qui est des engrais, elle indique les facteurs d'émissions liés à la fabrication (en kg d'équivalent CO<sub>2</sub> par kg de produit) et liés à l'épandage

<sup>142</sup> Entre 55 et 73 kt sur la période 2016-2019.

<sup>143</sup> UIPP : Union des industries de la protection des plantes.

<sup>144</sup> Entre 2 130 et 2 248 kt d'azote et entre 181 et 191 kt de phosphore sur la période 2016-2019.

<sup>145</sup> Voir [https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLoad\\_DOC\\_FR/index.htm?engrais\\_et\\_composes\\_azotes.htm](https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLoad_DOC_FR/index.htm?engrais_et_composes_azotes.htm).

de produits azotés (en kg de N<sub>2</sub>O par kg de produit appliqué). Toutefois, ce dernier facteur pâtit d'un fort degré d'incertitude (de -80 % à +400 %), car il dépend de plusieurs phénomènes naturels. Nous indiquons tout de même l'intervalle de valeurs correspondant à cette marge d'incertitude pour quantifier ce facteur, car le N<sub>2</sub>O issu de l'épandage (à travers la décomposition de l'engrais dans les champs) est généralement la principale source d'émissions des engrais. L'incertitude sur les valeurs relatives à la fabrication des engrais et à la totalité du cycle de vie des produits phytopharmaceutiques (valables pour l'Europe) est quant à elle de 30 %. À partir des intervalles de valeurs des volumes de produits agricoles économisés, calculés selon la méthode exposée ci-avant, nous avons pu déduire les émissions de GES évitées grâce à une production inférieure (à efficacité constante) de produits phytopharmaceutiques et d'engrais du fait d'une optimisation des traitements agricoles par rapport à une situation où les agriculteurs n'auraient pas accès à des prévisions météorologiques précises.

La méthode employée pour estimer le volume de traitements inefficaces dans la situation existante et dans le scénario contrefactuel est celle décrite à l'annexe C.1.

**Nous avons cherché à quantifier** (toujours sous la forme d'un intervalle, partant de l'hypothèse qu'entre 10 % et 30 % des traitements échouent dans le scénario contrefactuel, tel que décrit à l'annexe C.1) **la diminution de l'impact environnemental sur la biodiversité résultant de la baisse de la part des traitements azotés ayant échoué.**

D'après Savci (2012), même dans des conditions idéales, entre 2 % et 10 % des engrais azotés appliqués sur les sols pénètrent dans les eaux de surface ou les eaux souterraines, tandis que 50 % sont utilisés par les plantes, de 2 % à 20 % sont perdus par évaporation et de 15 % à 25 % réagissent avec les composés organiques présents dans les sols argileux. Lorsqu'un traitement échoue en raison de mauvaises conditions météorologiques (telles que de fortes pluies), les plantes n'ont pas le temps d'absorber le produit avant qu'il soit emporté par ruissellement ou drainage vers les eaux de surface, et les composés organiques présents dans les sols ne peuvent réagir et absorber suffisamment de produit avant que celui-ci atteigne les eaux souterraines, car l'infiltration est trop rapide à cause de la pluie. Nous excluons donc de notre calcul la quantité de produit qui se retrouve dans les eaux même dans des conditions idéales (c'est-à-dire de 2 % à 10 %) ainsi que celle perdue par évaporation. Toutefois, nous estimons qu'en cas de mauvaises conditions météorologiques rendant les traitements inefficaces, la quantité de produit qui serait normalement absorbée par les plantes et les sols argileux termine dans les eaux (de surface et souterraines), ce qui signifie que **70 % des engrais azotés se retrouvent dans les eaux en cas d'échec des traitements.**

Sur le fondement de cette hypothèse, **un service de prévisions météorologiques précises permettant de diminuer le nombre de traitements inefficaces éviterait qu'entre 76,5 kt et 382 kt d'azote se retrouvent dans les eaux.**

Cosme et Hauschild (2017) ont estimé les atteintes à la biodiversité découlant d'un excès d'azote dans les eaux à partir de facteurs d'impact représentant la propension des émissions d'azote à entraîner une eutrophisation et une hypoxie. À l'aide d'une distribution de la sensibilité des espèces, notamment en Europe, ils ont estimé l'indicateur « fraction des espèces susceptible de disparaître » (*Potentially Disappeared Fraction of species* ou PDF) par kilogramme d'azote dans l'eau. Cette analyse a été réalisée pour l'azote provenant des sols (agriculture) et pour celui directement injecté dans les eaux (douces ou côtières). Dans notre étude, nous avons utilisé le premier indicateur pour mesurer l'impact des activités agricoles.

Une étude des indicateurs permettant d'évaluer la biodiversité<sup>146</sup> définit le PDF comme « le taux de perte d'espèces (ou, en termes écologiques, le taux d'extinction) sur une certaine surface de terre ou un certain volume d'eau pendant une certaine durée en raison de conditions défavorables liées à la conversion des sols, l'occupation des sols, une toxicité, la hausse de la température moyenne mondiale ou une eutrophisation ».

Cosme et Hauschild trouvent en Europe une moyenne de  $140(PDF)m^3 \cdot an \cdot kgN^{-1}$ . La France étant caractérisée par une biodiversité plutôt hétérogène (avec ses fleuves, l'océan Atlantique, la mer méditerranée, la Manche), **il semble approprié d'utiliser la valeur moyenne pour l'Europe, car sa biodiversité présente une grande variété et n'est pas très spécifique.**

À partir de cette estimation et du différentiel de volume d'azote se retrouvant dans les eaux, nous pouvons calculer les atteintes à la biodiversité évitées grâce à l'optimisation des applications d'engrais azotés permise par les prévisions météorologiques.

<sup>146</sup> A Review of Biodiversity and Land-Use Metrics, Indices, and Methodologies as Related to Agricultural Products, Christy Melhart Slay, Ph.D.

**Nous avons cherché à estimer le différentiel de surfaces brûlées en France entre la situation existante et le scénario contrefactuel** résultant de la qualité des prévisions météorologiques fournies par Météo-France, ainsi que des prévisions à moyen terme du CEPMMT et des données d'observation de la Terre d'EUMETSAT.

La fréquence et l'intensité des feux de forêt variant considérablement d'une année à l'autre, **nous n'avons comparé que des tendances sur une certaine durée de manière à lisser l'hétérogénéité annuelle**. De ce fait, pour mesurer cet impact, la situation réelle comparée au contrefactuel correspond à la période 2010-2019, car elle est représentative de la dynamique actuelle en matière d'incendies et couvre toute la période d'existence des OAT vertes (lancées en 2016).

S'agissant du scénario contrefactuel, nous avons décidé d'utiliser les données de la période 1976-1990 pour les raisons suivantes : pendant cette période, le service de prévision météorologique fourni par Météo-France reposait uniquement sur le modèle EMERAUDE, d'une résolution de 35 km (longueur de chaque maille de la grille), soit presque l'équivalent de la résolution actuelle du modèle américain GFS sur l'Europe (28 km). Le modèle ARPEGE est apparu un peu plus tard (1992), avec des mailles de 30 km. Cette période pouvait donc être employée comme contrefactuel, car cela nous permettait d'obtenir des données sur les forêts brûlées dans un contexte où la sécurité civile bénéficiait d'un niveau de soutien similaire à celui de notre scénario contrefactuel. Néanmoins, bien que nous ayons utilisé les données de la période 1976-1990 comme contrefactuel, nous voulions comparer la situation réelle (2010-2019) à ce qui se serait produit sans subventions publiques sur cette même période. En d'autres termes, même si notre scénario reposait sur un niveau de prévisions équivalent à celui de la période 1976-1990, le contexte avait changé depuis et nous avons dû ajuster les données de cette période pour simuler ce qui se serait produit si le modèle Émeraude avait été le seul disponible entre 2010 et 2019. Avant de comparer les surfaces brûlées de la période 1976-1990 à celles de la période 2010-2019, nous avons dû donc prendre en compte plusieurs aspects et procéder aux ajustements correspondants :

- **La surface forestière a augmenté depuis la période 1976-1990**, accroissant ainsi le risque d'incendie. D'après l'inventaire des forêts réalisé par l'Institut national de l'information géographique et forestière, la surface forestière a augmenté en France pour passer de 14,1 millions d'hectares en 1985 à 16,1 millions d'hectares en 2009, puis 16,9 millions d'hectares en 2019. Ainsi, entre 2010 et 2019, la surface forestière moyenne était d'environ 16,5 millions d'hectares. Nous manquons de données sur l'évolution de la surface forestière entre 1976 et 1990, mais avons supposé que la surface en 1985 correspondait à la moyenne sur cette période. Nous savons que, sur cette même période, la surface brûlée chaque année à la suite de feux de forêt était en moyenne de 45 000 ha (voir ci-avant), soit environ 0,32 % de la surface forestière totale. En appliquant ce taux à la surface forestière moyenne de la dernière décennie, on obtient environ 53 000 ha de forêt brûlée. Pour tenir compte de l'extension de la surface forestière dans le scénario contrefactuel, nous avons ajouté ces 8 000 ha supplémentaires à la surface brûlée pendant la période 1976-1990.
- **Le risque climatique a aussi augmenté depuis cette période**, essentiellement en raison du réchauffement climatique. Cela a notamment pour conséquence une hausse du risque de feux de forêt, représenté par l'indice forêt météo (IFM). Chartry *et al.* (2010) ont indiqué dans leur rapport pour le compte de Météo-France que la moyenne annuelle de l'IFM sur la période 1991-2009 était 20 % plus élevée que sur la période 1976-1990. D'après leurs simulations, l'IFM annuel moyen devrait encore augmenter de 15 % d'ici à 2040 en raison du réchauffement climatique. Ils affirment également que la moyenne annuelle de surface brûlée, de 45 000 ha entre 1976 et 1990, a dû augmenter de 10 000 ha sur la période 1991-2009 en raison de l'extension de la surface forestière et de la hausse de l'IFM. Au vu des données sur la surface forestière fournies par les auteurs, nous avons déduit que, sur cette hausse, 6 000 ha s'expliquaient par l'extension de la surface forestière et donc que les 4 000 ha restants résultaient de la hausse de l'IFM. De plus, il est probable que l'IFM annuel moyen de notre période de référence (2010-2019) soit légèrement supérieur à celui de la période 1991-2009. Nous avons donc estimé que 5 000 ha de forêt supplémentaires auraient été brûlés dans notre scénario contrefactuel et les avons ajoutés à la surface brûlée sur la période 1976-1990. Ainsi, la surface forestière



brûlée dans notre scénario contrefactuel s'élevait à 45 000 ha (données pour la période 1976-1990) + 8 000 ha (surface forestière) + 5 000 ha (risque climatique) = 58 000 ha (augmentation de 29 %).

- Enfin, il convient de tenir compte du fait que **les actions et les ressources de la sécurité civile se sont améliorées** depuis la période 1976-1990 et que des **mesures de prévention ont été adoptées, telles que les plans de gestion forestière et les plans de prévention des risques d'incendies de forêt** depuis 1995. Ces évolutions, associées aux progrès réalisés en matière de prévisions météorologiques, peuvent avoir contribué à réduire globalement la surface brûlée. Bien que nous ne puissions évaluer la part de cette réduction liée aux mesures de gestion forestière, aux ressources de la sécurité civile ou à l'aide apportée par les prévisions météorologiques, il est probable que ce dernier facteur soit prépondérant. En effet, Chartry *et al.* (2010) rappellent que si le renforcement des moyens de prévention et de contrôle est sans doute l'une des causes de cette baisse, ces moyens ne pouvaient être employés aussi efficacement qu'avec l'amélioration de la prévision des risques sur le territoire (en particulier grâce aux projections climatiques à long terme). Le principal facteur de cette évolution semble donc être l'utilisation accrue des prévisions météorologiques. **Nous avons estimé que le différentiel de surface brûlée devait être modéré de 30 %**, ce qui signifie que l'amélioration de la gestion forestière et de la sécurité civile, indépendamment des services de prévision météorologique de qualité (supposément absents dans le scénario contrefactuel), a contribué à hauteur de 30 % à la réduction de la moyenne annuelle de surface forestière brûlée entre la période 1976-1990 ajustée<sup>147</sup> (scénario contrefactuel) et la période 2010-2019.

La moyenne annuelle de surface forestière brûlée était de 11 805 ha sur la période 2010-2019 (DGSCGC). On constate donc un différentiel de surface brûlée égal à (58 000 ha - 11 805 ha) x 70 % (70 % correspondant à la part de cette baisse s'expliquant par les prévisions météorologiques), soit **environ 32 000 ha par an en moyenne**.

Vilén et Fernandes (2011) ont calculé les émissions de CO<sub>2</sub> provenant des feux de végétation en France entre 1980 et 2008. À partir de la moyenne annuelle de surface brûlée sur cette période (28 460 ha), d'une estimation de la biomasse brûlée (qui dépend de la surface brûlée, de la quantité moyenne de matière organique par unité de surface et de l'efficacité de combustion de la biomasse) et du facteur d'émissions (la quantité de CO<sub>2</sub> libéré par kg de matière sèche brûlée), ils ont déterminé que les feux de végétation en France entraînaient en moyenne 1 340 682 tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub> par an. Les auteurs ont calculé les facteurs de combustion et les facteurs d'émissions à partir des conditions de la région méditerranéenne, ce qui est pertinent puisque la plupart des incendies en France se produisent dans cette région.

**Nous pouvons déduire de leurs résultats qu'environ 47 tonnes de CO<sub>2</sub> sont émises par hectare brûlé en moyenne.** Nous insistons sur le fait qu'il s'agit d'une moyenne et que le nombre réel dépend fortement du type de forêt brûlée. Toutefois, comme il existe peu d'études publiées sur ce sujet et que la valeur obtenue ne semble pas excessive, nous pensons que son utilisation ne conduira pas à une surestimation de l'impact. Nous ne pouvons cependant pas exclure la possibilité que les résultats soient sous-estimés.

À partir de cette estimation et du différentiel de surfaces brûlées entre la situation existante et le scénario contrefactuel attribué aux prévisions météorologiques, nous avons alors pu calculer le volume d'émissions de CO<sub>2</sub> évitées chaque année.

---

<sup>147</sup> Ce pourcentage est appliqué à la surface forestière brûlée sur la période 1976-1990 après ajustements liés à l'extension de la surface forestière et au renforcement du risque climatique. En effet, les mesures de gestion forestière et l'amélioration des ressources de la sécurité civile ont contribué à réduire les incendies malgré la progression du risque.

**Nous avons cherché à estimer la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> évitées grâce à la baisse des ajustements réalisés sur le marché de l'électricité au moyen de sources fossiles, à la suite de la diminution des erreurs de prévision de la production d'énergie éolienne (en évitant une sous-production par rapport à la demande).**

À partir de données de RTE<sup>148</sup>, nous avons calculé le volume agrégé, en MWh, des erreurs entre la production prévue (à J-1 et à H-7) et la production effective sur l'année 2019. En divisant le volume total surestimé sur l'année par le volume total effectivement produit, nous avons obtenu un taux d'erreur. **Pour les prévisions à J-1, ce taux d'erreur est de 6,1 %, et il descend à 5,9 % à H-7.** Nous avons ainsi constaté qu'il n'y avait pas une grande différence entre les deux. Comme nous savions que RTE commençait les ajustements 2 à 3 heures avant le temps réel, nous aurions idéalement dû utiliser les prévisions à H-2, mais nous ne disposons pas de telles données. Nous avons donc décidé de retenir le taux d'erreur à H-7, sans oublier toutefois que le taux d'erreur au moment des ajustements pourrait être légèrement inférieur étant donné que les prévisions sont alors plus proches du temps réel. Par conséquent, nous avons considéré que **le taux d'erreur de 5,9 % sur la production d'énergie éolienne était surestimé et devait être ajusté pour se rapprocher de la réalité.**

S'agissant du scénario contrefactuel, **nous n'avons trouvé aucune étude comparant l'effet que peuvent avoir de bonnes prévisions météorologiques sur les prévisions de production d'énergie éolienne à celui qu'auraient des prévisions non locales et moins fiables, telles que celles obtenues via le modèle GFS.** Néanmoins, Wang *et al.* (2019) ont montré qu'entre un modèle « basse fidélité » et un modèle « moyenne fidélité » de prévision des vents, le second pouvait réduire les erreurs de prévision de la production d'énergie éolienne de 10 % à 11 % par an par rapport au premier. Ils indiquaient également qu'entre un modèle « basse fidélité » et un modèle « haute fidélité » de prévision des vents, le second pouvait réduire les erreurs de prévision de la production d'énergie éolienne de plus de 15 % par an par rapport au premier. Il était difficile d'extrapoler ces résultats à notre étude, car nous ne disposons pas d'informations précises sur ces trois modèles et, en particulier, sur le modèle « basse fidélité », qui pourrait différer du modèle américain GFS supposément utilisé dans notre scénario contrefactuel.

Toutefois, **nous avons estimé que les modèles actuellement utilisés pour produire les prévisions en France pouvaient être considérés comme des modèles à moyenne ou haute fidélité et le modèle GFS comme un modèle à basse fidélité, car un entretien avec des représentants de RTE a confirmé que le modèle GFS ne serait pas suffisamment fiable pour réaliser ses prévisions de production d'énergie éolienne.** Cette méthode permet d'obtenir un ordre de grandeur de l'impact, qui doit cependant être considéré avec précaution car il dépend de cette hypothèse non vérifiée. **Nous avons donc supposé que les prévisions météorologiques dans la situation existante permettaient de réduire les erreurs de 10 % à 20 % par rapport au scénario contrefactuel (nous sommes allés jusqu'à un taux légèrement supérieur à 15 %, car les modèles de Météo-France et du CEPMMT sont réputés être de haute qualité).**

**Une fois établi le différentiel de taux d'erreur de prévision de la production d'énergie éolienne, nous avons cherché à en estimer l'effet sur les volumes des ajustements, en particulier sur ceux réalisés au moyen d'énergies fossiles (issues de la production nationale ou importées).** Nous savions qu'en 2019, le volume total des ajustements (à la hausse) a été de 3,52 TWh, dont 5,1 % réalisés en utilisant la production nationale d'énergies fossiles et 36,6 % au moyen d'importations. **Nous avons voulu connaître précisément les volumes des ajustements réalisés au moyen d'énergie issue du pétrole, du gaz ou du charbon, d'origine nationale ou étrangère.**

S'agissant de la production nationale d'énergies fossiles, nous avons calculé, à l'aide des informations sur le bouquet énergétique de la France en 2019 publiées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la part de la production totale d'énergies fossiles en France issue du pétrole, du charbon et du gaz (12,6 % pour le charbon, 12,7 % pour le pétrole et 74,7 % pour le gaz). Nous avons ensuite appliqué ces pourcentages au volume des ajustements réalisés au moyen d'énergies fossiles nationales (5,1 % du volume total).

<sup>148</sup> Source : [https://www.services-rte.com/fr/telechargez-les-donnees-publiees-par-rte.html?activation\\_key%3Df32049d5-0ac9-4fb0-9e4b-0033463184f2%26activation\\_type%3Dpublic=true&category=generation&type=actual\\_generations\\_per\\_production\\_type](https://www.services-rte.com/fr/telechargez-les-donnees-publiees-par-rte.html?activation_key%3Df32049d5-0ac9-4fb0-9e4b-0033463184f2%26activation_type%3Dpublic=true&category=generation&type=actual_generations_per_production_type)

S'agissant des importations, nous savions par RTE qu'en 2019, 10 % des importations provenaient du Royaume-Uni, 52 % d'Allemagne, 22 % de Suisse, 1 % d'Italie et 15 % d'Espagne. Nous avons alors consulté le bouquet énergétique de chacun de ces pays en 2019 (données de l'AIE) et multiplié le volume des ajustements réalisés au moyen d'importations par le taux des importations provenant de chaque pays ainsi que par le taux d'énergie issue du charbon, du pétrole ou du gaz de chaque pays. Par exemple, pour calculer les ajustements réalisés au moyen de charbon importé, nous avons utilisé la formule suivante :

$$\text{volume des ajustements} \times \text{part des ajustements réalisés au moyen d'importations} \times (\text{part des importations britanniques} \\ \times \text{part de la production britannique issue du charbon} + \text{part des importations allemandes} \\ \times \text{part de la production allemande issue du charbon} \dots)$$

Enfin, nous avons estimé les émissions de CO<sub>2</sub> évitées en utilisant les facteurs d'émissions publiés par RTE<sup>149</sup>, issus de la banque de données de l'ADEME. La production d'électricité contribue aux émissions de CO<sub>2</sub> à hauteur de 0,986 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par MWh produit (t éq. CO<sub>2</sub>/MWh) pour la filière charbon, 0,777 t éq. CO<sub>2</sub>/MWh pour la filière pétrole et 0,429 t éq. CO<sub>2</sub>/MWh pour la filière gaz, en moyenne, sur la totalité du cycle de vie.

Nous avons ensuite multiplié les différentiels d'ajustements, pour chacune des sources d'énergies fossiles, par leurs facteurs d'émissions respectifs, et obtenu les émissions d'équivalent CO<sub>2</sub> évitées en 2019 grâce aux prévisions météorologiques fournies par Météo-France, le CEPMMT et EUMETSAT.

---

<sup>149</sup> Source : <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-emissions-de-co2-par-kwh-produit-en-france>.

## D. Projets récents et à venir auxquels participe le CNES (recherche dans le domaine de l'environnement)

Projet	Mission	Objectif	Opérationnel / recherche	Partenaires	Date de début	Date de fin
Aeolus	Mesurer les vents de l'atmosphère terrestre	Améliorer les prévisions météorologiques et les connaissances sur le climat	R	CNES, ESA	2018	-
Biomass	Cartographier la biomasse et la hauteur des forêts et quantifier la réduction annuelle de biomasse (déforestation)	Mieux comprendre le rôle joué par les forêts sur le cycle du carbone et sur les changements climatiques	R	CNES, ESA, CNRS...	2022	2027
Calipso	Localiser les couches nuageuses et les aérosols, mesurer leur altitude et révéler leurs propriétés optiques	Mieux comprendre comment les nuages et les aérosols agissent sur le climat	R	CNES, NASA	2006	2023
CfoSat	Mesurer les propriétés des vagues et l'intensité et la direction des vents à la surface des océans	Réaliser des prévisions en météorologie marine plus précises, avec la possibilité d'anticiper des événements extrêmes comme les fortes tempêtes et les cyclones	O (météorologie)	CNES, CNSA	2018	2021
Copernicus (Sentinel-2 et Sentinel-3)	Suivre l'évolution de l'occupation des sols, caractériser les variables bio-géophysiques sur les terres émergées, prévoir l'état des océans, apporter une aide à la gestion de crise sur des zones affectées par des catastrophes naturelles ou industrielles, suivre la composition chimique et la qualité de l'air, réanalyser des variables climatiques essentielles et développer des outils pour la mise en place de services climatiques		O, R	ESA, UE, États membres, CNES	2012	-
Cryosat	Mesurer l'épaisseur des glaces de mer (banquises) et de terre (calottes de l'Antarctique et du Groenland) au centimètre près	Surveiller l'étendue et le volume des glaces polaires et valider les prévisions de fonte des glaces liée au réchauffement climatique	R	ESA, CNES	2010	2017
Earthcare	Cartographier en 3D la couche de nuages et de gaz aérosols, tout en mesurant exactement la proportion dans laquelle les rayonnements solaires et thermiques terrestres sont renvoyés	Les équipes scientifiques vont affiner les modèles météorologiques, mais aussi mieux comprendre l'évolution du réchauffement climatique et ses conséquences	R	ESA, CNES, JAXA	2022	2025
Flex	Étudier l'émission de lumière fluorescente par la végétation, produite par le processus de photosynthèse	Les équipes scientifiques vont tenter d'améliorer la compréhension globale des effets de la photosynthèse sur la circulation du carbone entre végétation, atmosphère et cycle de l'eau	R	ESA, CNES	2022	2026

Grace	Reconstituer des cartes détaillées du champ de gravité terrestre jusqu'à une résolution spatiale de 200 km, qui mettent en évidence les évolutions temporelles des masses d'eau, de neige ou de glace	Obtenir des informations cruciales dans l'étude des océans et du climat de la Terre, notamment dans le contexte du réchauffement climatique	R	CNES, NASA, DLR	2002 (suite en 2018)	2017
Hy-2a	Étude physique des océans : hauteur et température des mers, vitesse des vents à leur surface	Mieux connaître les océans et le changement climatique	R	NSOAS, CNES	2011	-
Jason-3 et Sentinel-6	Assurer la continuité des données sur la hauteur des océans. S'inscrit dans le programme Copernicus (Sentinel-6)	Mesurer l'élévation du niveau des mers et mieux comprendre le gigantesque système de courants qui parcourt les océans tant en surface qu'en profondeur	O, R	CNES, NASA, EUMETSAT...	2016	2021
Megha-Tropiques	Étudier le cycle de l'eau et les échanges d'énergie dans l'atmosphère tropicale	Comprendre le climat, le cycle de l'eau et le bilan énergétique. Comprendre le changement climatique et mieux prédire les événements extrêmes	R	CNES, ISRO	2011	-
Merlin	Mesurer la concentration en méthane atmosphérique	Mieux comprendre les sources d'émission de ce gaz à effet de serre	R	CNES, DLR	2024	2027
Microcarb	Cartographier, à l'échelle planétaire, les sources et puits du principal gaz à effet de serre : le CO <sub>2</sub>	Mesurer les émissions de CO <sub>2</sub> dans les « zones blanches » pour mieux comprendre les origines et impacts du réchauffement climatique	R	CNES, CEA...	2021	2026
Smos	Mesurer l'humidité des sols et la salinité des océans (permet de détecter les courants marins, qui influent fortement sur le temps et le climat)	Le suivi de la salinité des océans permet de mieux comprendre le rôle des océans dans le cycle du carbone. L'humidité des sols renseigne sur les interactions entre la surface de la Terre, la végétation et l'atmosphère, ce qui permet d'augmenter la précision des prévisions météorologiques. Ces données permettent également de mieux évaluer les risques d'inondation et de sécheresse	R	CNES, ESA, CDTI	2009	2017
Swot	Mesure globale des hauteurs d'eau des fleuves, lacs et zones inondées, et des océans, hauturiers et côtiers	Améliorer les modèles hydrodynamiques fluviaux menant à des estimations des débits et déterminer les variations temporelles de stock d'eau. Observer les tourbillons ou les filaments, affiner les modèles de prévision océanographiques et climatiques...	R	CNES, NASA, CSA, UKSA	2022	2025
Trishna	Mesurer la température de surface de l'ensemble du globe terrestre	Comprendre l'évolution locale des phénomènes biologiques (stress hydrique, transpiration), physiques (évaporation,	R	CNES, ISRO	2024	2029

		sublimation, zones de panache) et climatiques (observation globale sur la durée) en lien avec le cycle de l'eau				
Vegetation	Suivi du couvert végétal à une échelle régionale et globale (instrument embarqué à bord de Spot-4, Spot-5 et du satellite européen Proba-V)	Offrir une vision de plus en plus fine de l'occupation des sols et de l'impact du réchauffement climatique	R	CNES, Commission européenne, Belgique...	1998	-
Venus	Suivi fin et régulier de la végétation terrestre (fournit des images de plus de 100 sites répartis sur l'ensemble de notre planète : forêts, cultures, espaces naturels protégés...)	Déterminer l'influence de facteurs environnementaux, des activités humaines et du changement climatique sur les surfaces continentales	R	CNES, ISA	2017	2021

## E. Exemple d'analyse d'une activité de Météo-France au regard des critères de la taxinomie de l'UE en matière d'adaptation

Étapes	Critères de la taxinomie	Activité : expertise et services climatiques
<b>Adaptation 9.1 : activités d'ingénierie et conseils techniques connexes consacrés à l'adaptation au changement climatique</b>		
Éligibilité au regard de la taxinomie	<p>Activités d'ingénierie et conseils techniques connexes consacrés à l'adaptation au changement climatique</p> <p>Une activité économique relevant de la présente catégorie constitue une activité <b>habilitante</b>.</p>	<p><b>Éligible</b> → L'expertise climatique repose sur l'observation et le traitement de données et a pour but de fournir des prévisions saisonnières et à long terme, mais aussi des <b>services de conseil</b> : <b>pour aider à la mise au point de stratégies d'adaptation des territoires</b> et de préservation de la biodiversité dans le contexte du changement climatique, Météo-France conçoit, produit et diffuse régulièrement des scénarios climatiques à l'échelle régionale, en répondant en particulier aux demandes de l'État et des autorités locales.</p>
Contribution substantielle à l'adaptation au changement climatique	<p>L'activité économique vise principalement à fournir des services de conseil à l'appui d'une ou de plusieurs activités économiques pour lesquelles les critères d'examen technique ont été énoncés dans la présente annexe, en vue de satisfaire à ces critères respectifs et de contribuer de manière substantielle à l'adaptation au changement climatique, tout en satisfaisant aux critères pertinents dans le respect du principe consistant à ne pas causer de préjudice important à d'autres objectifs environnementaux.</p> <p>L'activité économique répond à l'un des critères suivants :</p> <p><b>(a)</b> elle utilise des techniques de modélisation de pointe qui :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i) tiennent dûment compte des risques liés au changement climatique ;</li> <li>ii) ne s'appuient pas uniquement sur des tendances historiques ;</li> <li>iii) intègrent des scénarios prospectifs ;</li> </ul> <p><b>(b)</b> elle élabore des modèles et des projections en matière de climat, des services et une évaluation des incidences, les meilleures données scientifiques disponibles en matière d'analyse de la vulnérabilité et des risques, ainsi que des méthodologies connexes, dans l'esprit des rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et des publications scientifiques évaluées par des pairs les plus récents.</p> <p>L'activité économique supprime les obstacles à l'adaptation liés à l'information, à la finance, à la technologie et aux capacités.</p> <p>Le potentiel de réduction des incidences matérielles dues aux risques climatiques est cartographié au moyen d'une évaluation rigoureuse des risques climatiques dans l'activité économique cible.</p> <p>Les activités de conception architecturale tiennent compte des orientations en matière de résilience au changement climatique, de la modélisation des aléas liés au climat, et permettent l'adaptation de la construction et des infrastructures, y compris des codes de construction et des systèmes de gestion intégrée.</p> <p>Les solutions d'adaptation mises en œuvre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(a) n'ont pas d'incidence négative sur les efforts d'adaptation ou sur le niveau de résilience aux risques climatiques physiques d'autres populations, de la nature, du patrimoine culturel, des biens et d'autres activités économiques ;</li> <li>(b) privilégient des solutions fondées sur la nature ou s'appuient, dans la mesure du possible, sur des infrastructures bleues ou vertes ;</li> <li>(c) sont compatibles avec les stratégies et plans d'adaptation menés aux niveaux local, sectoriel, régional ou national ;</li> <li>(d) sont suivies et mesurées à l'aune d'indicateurs prédéfinis et des actions correctives sont envisagées lorsque ces indicateurs ne sont pas atteints ;</li> <li>(e) lorsque la solution mise en œuvre est de nature physique et consiste en une activité pour laquelle des critères d'examen</li> </ul>	<p><i>Cette case est en orange, car nous ne pouvons pas prouver que chacun des critères de la taxinomie est satisfait, même si, d'après notre analyse, il est très probable que cela soit le cas.</i></p> <p>(a) Météo-France utilise des techniques de modélisation pour évaluer les risques liés au changement climatique (par exemple, pour la sécurité civile, l'évolution du risque de feux de forêt), modéliser l'évolution passée du climat et prévoir les scénarios possibles à l'avenir.</p> <p>(b) La connaissance détaillée des évolutions climatiques passées et l'étude des futurs possibles constituent un point de départ essentiel. Météo-France collabore avec le GIEC pour élaborer des projections climatiques destinées au rapport du groupe, sur le fondement de solides connaissances scientifiques.</p> <p>Météo-France fournit aussi des services climatiques favorisant la mise en œuvre de mesures d'adaptation opérationnelles : des <b>portails et applications web</b> (« Climat HD », « DRIAS, les futurs du climat ») qui présentent des cartes de l'évolution de nombreux indicateurs climatiques jusqu'à la fin du siècle, ainsi que des <b>services climatiques</b> plus ciblés, conçus en collaboration avec des acteurs de différents secteurs pour aider ces derniers. Ces services sont devenus plus accessibles grâce au Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique, dont Météo-France est partenaire. Ce centre est destiné à aider tout acteur ayant engagé un processus d'adaptation en lui donnant accès à un éventail de ressources adaptées à chaque secteur. Toutes les thématiques de l'adaptation au changement climatique sont couvertes : les effets du changement climatique sur la santé, l'eau, l'agriculture, la forêt, les sols, la biodiversité, les risques naturels, la planification urbaine, la mobilité, la pêche et l'aquaculture, le tourisme et le secteur financier.</p> <p><i>Exemple : évaluer les conséquences des politiques d'urbanisme sur les températures dans les villes à l'aide d'une plateforme de modélisation permettant d'orienter les choix en matière de végétalisation des toits, d'élargissement des rues ou de réintroduction de la biodiversité.</i></p> <p><b>L'activité économique supprime donc les obstacles à l'adaptation liés à l'information.</b></p> <p>« Le potentiel de réduction des incidences matérielles dues aux risques climatiques est cartographié au moyen d'une évaluation rigoureuse des risques climatiques dans l'activité économique cible. » → <b>informations à ce sujet difficiles à obtenir</b></p>

Étapes	Critères de la taxinomie	Activité : expertise et services climatiques
	technique ont été spécifiés dans la présente annexe, la solution satisfait aux critères d'examen technique applicables à cette activité selon le principe consistant à ne pas causer de préjudice important.	« Les solutions d'adaptation mises en œuvre... » → <b>informations à ce sujet difficiles à obtenir</b>
Ne pas causer de préjudice important	1) L'activité n'est pas exercée à des fins d'extraction ou de transport de combustibles fossiles.	L'activité n'est effectivement pas exercée à des fins d'extraction ou de transport de combustibles fossiles.
	3) Cette activité respecte les critères établis à l'appendice B de la présente annexe.	Cette activité n'est pas préjudiciable au bon état ou au bon potentiel écologique des masses d'eau, y compris les eaux de surface et les eaux souterraines, ou au bon état écologique des eaux marines (conformément à l'article 17 du règlement sur la taxinomie), car l'activité n'est pas matérielle.
	4) Néant	Néant
	5) Néant	Néant
	6) Néant	Néant
Garanties sociales	Respect des principes directeurs de l'OCDE à l'intention des entreprises multinationales et des principes directeurs des Nations unies relatifs aux entreprises et aux droits de l'homme	Oui : Météo-France est dans l'obligation de respecter le droit du travail français.



## F. Extrait pertinent du règlement sur la taxinomie

### Règlement sur la taxinomie – Article 17 : Préjudice important causé aux objectifs environnementaux

1. Aux fins de l'article 3, point b), compte tenu du cycle de vie des produits et des services fournis par une activité économique, y compris des éléments de fait tirés d'analyses du cycle de vie existantes, cette activité économique est considérée comme causant un préjudice important :

a) à l'atténuation du changement climatique, lorsque cette activité génère des émissions importantes de gaz à effet de serre ;

b) à l'adaptation au changement climatique, lorsque cette activité entraîne une augmentation des incidences négatives du climat actuel et de son évolution attendue sur elle-même ou sur la population, la nature ou les biens ;

c) à l'utilisation durable et à la protection des ressources aquatiques et marines, lorsque cette activité est préjudiciable :

i) au bon état ou au bon potentiel écologique des masses d'eau, y compris les eaux de surface et les eaux souterraines ; ou

ii) au bon état écologique des eaux marines ;

d) à l'économie circulaire, y compris la prévention des déchets et le recyclage, lorsque :

i) cette activité est caractérisée par une inefficacité significative dans l'utilisation des matières ou dans l'utilisation directe ou indirecte de ressources naturelles telles que les sources d'énergie non renouvelables, les matières premières, l'eau et la terre, lors d'une ou de plusieurs étapes du cycle de vie des produits, notamment en termes de durabilité, de réparabilité, d'évolutivité, de réutilisabilité ou de recyclabilité des produits ;

ii) cette activité entraîne une augmentation notable de la production, de l'incinération ou de l'élimination de déchets, à l'exception de l'incinération de déchets dangereux non recyclables ; ou

iii) l'élimination à long terme des déchets peut avoir d'importants effets néfastes à long terme sur l'environnement ;

e) à la prévention et à la réduction de la pollution, lorsque cette activité entraîne une augmentation notable des émissions de polluants dans l'air, l'eau ou le sol, par rapport à la situation antérieure au lancement de l'activité ; ou

f) à la protection et à la restauration de la biodiversité et des écosystèmes, lorsque cette activité est :

i) fortement préjudiciable au bon état et à la résilience d'écosystèmes ; ou

ii) préjudiciable à l'état de conservation des habitats et des espèces, y compris ceux qui présentent un intérêt pour l'Union.

2. Lors de l'évaluation d'une activité économique au regard des critères énoncés au paragraphe 1, l'impact environnemental de l'activité même, ainsi que l'impact environnemental des produits et services fournis par cette activité tout au long de leur cycle de vie, sont pris en considération, notamment en ce qui concerne la production, l'utilisation et la fin de vie de ces produits et services.