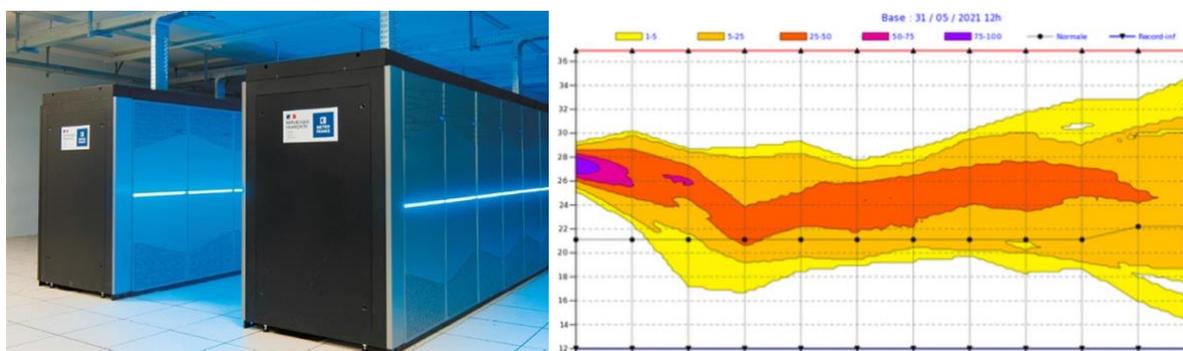


**Contre-expertise  
de l'évaluation socio-économique  
du renouvellement des supercalculateurs  
de Météo France en 2025**



AID René  
FREY Pascal

12 avril 2022

## Préambule

La loi du 31 décembre 2012 instaure l'obligation d'évaluation socio-économique préalable des projets d'investissements (sans seuil) financés par l'État et ses établissements publics et une contre-expertise indépendante de cette évaluation lorsque le niveau de financement dépasse un seuil que le décret d'application de la loi a fixé à 100 M€.

C'est donc en respectant toutes les règles prévues dans le décret d'application 2013-1211 (exigences du contenu du dossier, indépendance des contre-experts, délais) que le SGPI a fait réaliser cette contre-expertise indépendante de l'évaluation de ce projet.

Ce rapport a été établi à partir des documents fournis par Météo France et des réponses apportées aux questions des contre-experts tout au long de la procédure. Il ne saurait être reproché à ce rapport de ne pas tenir compte d'éléments qui n'auraient pas été communiqués à ses auteurs.

Les auteurs souhaitent remercier les personnels de Météo-France, d'EDF et de Covéa, qui ont été interrogés dans le cadre de cette contre-expertise, pour leur réactivité et la qualité des auditions qui ont permis d'apporter des réponses satisfaisantes aux questions soulevées par la contre-expertise.

# Sommaire

<b>PREAMBULE</b> .....	<b>2</b>
<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>3</b>
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	<b>4</b>
<b>2 CONTEXTE ET ENJEUX</b> .....	<b>5</b>
2.1 LES MISSIONS DE METEO FRANCE.....	5
2.2 LA PREVISION NUMERIQUE DU TEMPS ET LA PROJECTION CLIMATIQUE .....	5
2.3 NATURE DE L'INVESTISSEMENT ET BENEFICES ATTENDUS .....	6
<b>3 LES DIFFERENTES OPTIONS D'INVESTISSEMENT</b> .....	<b>10</b>
3.1 METHODE DE CONSTRUCTIONS DES OPTIONS .....	12
3.2 DESCRIPTION DES TROIS OPTIONS RETENUES .....	13
<b>4 ÉVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE PAR SECTEUR</b> .....	<b>15</b>
4.1 PRINCIPES ET RESUME DES EVALUATIONS .....	15
4.2 SECURITE DES PERSONNES ET DES BIENS.....	16
4.3 SANTE.....	18
4.4 DEFENSE.....	19
4.5 ÉNERGIE.....	19
4.6 AGRICULTURE.....	20
4.7 AVIATION CIVILE .....	21
4.8 TRANSPORT TERRESTRE.....	21
4.9 DISTRIBUTION .....	22
4.10 ACTIVITES DES FOURNISSEURS DE SERVICES METEO ET FABRICATION DE SUPERCALCULATEURS .....	23
4.11 PROJECTION CLIMATIQUE.....	24
4.12 SYNTHÈSE.....	24
<b>5 METHODE D'EVALUATION ET STRATEGIE DE METEO FRANCE</b> .....	<b>26</b>
5.1 LE CRITERE DE PUISSANCE EST LISIBLE, MAIS REDUCTEUR .....	26
5.2 LES GAINS SOCIO-ECONOMIQUES NE DEPENDENT PAS DE FAÇON CONTINUE DE LA PERFORMANCE DE CALCUL .....	29
5.3 LA STRATEGIE DE METEO FRANCE EST ORIENTEE PAR LES BESOINS DES USAGERS INSTITUTIONNELS ET NON PAR LA VALEUR ECONOMIQUE VIS-A-VIS DES TIERS EXTERIEURS .....	30
<b>6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</b> .....	<b>32</b>
<b>7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>34</b>

# 1 Introduction

Dans une première partie, le projet de rapport de contre-expertise introduit et décrit le contexte et les enjeux de la prévision numérique du temps à Météo-France. Dans une deuxième partie sont présentées et discutées les différentes options d'investissement telles que proposées par Météo-France dans le document d'évaluation socio-économique. Une évaluation socio-économique par secteurs est présentée dans la troisième partie de notre rapport qui se termine par une évaluation globale des scénarii. La cinquième partie porte sur la méthode d'évaluation, en pointant notamment l'absence d'étude de risques dans l'étude, et interroge la stratégie de Météo-France pour le renouvellement de ses supercalculateurs. Le rapport se termine par un ensemble de conclusions et de recommandations de la contre-expertise.

La contre-expertise s'est principalement appuyée sur le document d'évaluation socio-économique du renouvellement des supercalculateurs, fourni par Météo-France à l'appui de sa demande. Ce document de 130 pages a été élaboré par le cabinet Citizing en septembre 2021<sup>1</sup>. Le travail de contre-expertise a été complété par des auditions avec un assureur (Covéa) et un producteur d'électricité (EDF) ainsi que par trois auditions thématiques avec la direction de l'établissement : une première portait sur le fonctionnement de la prévision numérique du temps, une seconde sur les évaluations socio-économiques, une troisième sur l'activité commerciale de Météo France.

---

<sup>1</sup> Évaluation socio-économique du renouvellement des supercalculateurs de Météo-France en 2025, CITIZING pour Météo-France, septembre 2021.

## 2 Contexte et enjeux

Nous décrivons dans cette section les missions de Météo France, le processus opérationnel de la prévision numérique du temps et enfin, nous présentons l'investissement en jeu et les bénéfices attendus.

Cette section se fonde sur les documents fournis par Météo France ainsi que sur les entretiens réalisés avec l'équipe de direction de Météo France.

### 2.1 Les missions de Météo France

Météo France est un établissement public placé sous la tutelle du ministère de la Transition Écologique. L'établissement est lié à l'État par un Contrat d'objectifs et de performance quinquennal (COP 2022-2026), qui fixe les orientations stratégiques à cinq ans et les objectifs de l'établissement pour mieux répondre aux attentes des citoyens, de l'État et du monde économique, chacun de ces acteurs étant confronté à son niveau aux défis du changement climatique.

Les missions de Météo France sont multiples.

La première consiste à observer le temps qu'il fait et à prévoir le temps à venir. Ces observations ne se limitent pas au territoire national (métropole et départements et régions d'outre-mer). Les prévisions sont variées : elles vont de quelques heures à plusieurs jours.

La seconde est d'assurer la sécurité des biens et des personnes vis-à-vis des événements météorologiques. Météo France gère le système de Vigilance permettant de prévenir les concitoyens et les pouvoirs publics de phénomènes météorologiques dangereux. L'établissement fournit également des prévisions adaptées aux transports aériens sur le territoire français. Il contribue à la Défense Nationale, à la sécurité en mer et à la défense de l'environnement en surveillant la qualité de l'air.

Ces deux premières missions constituent l'activité régalienne de service public de Météo France de prévision météorologique pour tous les acteurs économiques de territoire national. Ces prévisions sont accessibles gratuitement.

Sa troisième mission consiste en l'étude à long terme du climat. Météo France observe les évolutions actuelles du climat et effectue des prévisions du climat futur.

Par ailleurs, Météo France contribue au développement des connaissances sur la prévision du temps et le climat à travers ses équipes de recherche et ses partenariats avec la communauté scientifique.

Enfin, il entre également dans les missions de l'établissement de développer une activité commerciale de services autour des données météorologiques et des différentes prévisions. Cette activité compte des clients dans l'ensemble des secteurs de l'économie. Les secteurs du transport routier et aérien (18 %), de l'énergie (11 %) et de l'activité maritime (11 %) représentent à eux trois 40 % du chiffre d'affaires de l'établissement en 2020.

### 2.2 La prévision numérique du temps et la projection climatique

La prévision numérique du temps (PNT) fournit à l'ensemble des acteurs de l'économie des prévisions du temps à l'horizon de quelques heures (de 1h à 6h, prévision immédiate) jusqu'à 5 jours. Au-delà de cet horizon, il existe des prévisions à dix et quinze jours effectuées par le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMET).

La PNT fonctionne en résolvant numériquement un système d'équations aux dérivées partielles modélisant la dynamique des flux atmosphériques et de leurs caractéristiques (température, pression, vitesse...). La résolution numérique s'effectue sur un maillage tridimensionnel de

l'atmosphère terrestre et de son interaction avec les océans. La qualité des prévisions ne dépend pas seulement de la finesse du maillage du territoire sur lequel s'effectue la prévision. Elle dépend également du réseau de mesures et de leur assimilation dans les modèles de calcul, mais aussi du territoire sur lequel s'effectue la prévision. Les territoires offrant un relief compliqué rendent la prévision plus incertaine.

Deux modèles de calcul sont particulièrement concernés dans cette étude socio-économique. Il s'agit des modèles ARPEGE et AROME.

- ARPEGE est un modèle à aire planétaire fournissant une prévision des phénomènes de grande ampleur (dépression, anticyclone) à un horizon de quatre jours. Il offre un maillage de 5 km sur l'Europe et de 24 km aux antipodes.
- AROME est un modèle à aire limitée fournissant des prévisions à un horizon de 5 jours. Il couvre l'espace France, Belgique, Luxembourg, Allemagne, Pays-Bas et Suisse, cinq zones en outre-mer et des zones requises au titre de la Défense. Il présente un maillage de 1 à 3 km. ARPEGE lui fournit les conditions aux bords nécessaires à ses prévisions.

Par ailleurs, l'établissement fournit des prévisions ensemblistes du temps. Par perturbation des conditions initiales en entrée des modèles de prévision, Météo France peut fournir un ensemble de trajectoires possibles du temps dans les jours à venir. Ces trajectoires sont appelées des membres.

La PNT est un processus opérationnel s'exécutant en continu. Ce besoin impose aux modèles de Météo France de s'effectuer en moins de 1H30.

Par ailleurs, la PNT est un processus critique au sens où il incombe à Météo France d'être en mesure de fournir en moins de trois heures sur alerte des autorités les prévisions de dispersions de composants chimiques ou nucléaires.

Pour satisfaire à son devoir de fiabilité, l'établissement dispose de deux machines de calcul jumelles, l'une prenant le relais de l'autre en cas de défaillance. Enfin, le volume des données en entrée des modèles est trop important pour considérer un autre schéma d'organisation que celui des deux machines sur le même site.

L'établissement dispose également de modèles lui permettant d'étudier le climat à plus long terme.

D'une part, Météo France effectue des prévisions saisonnières. Ces prévisions à un horizon de trois à six mois ont pour objectif de déterminer les anomalies du climat par rapport au climat normal.

D'autre part, Météo France met en œuvre ou a le projet de mettre en œuvre des versions adaptées de ses modèles ARPEGE et AROME pour effectuer des projections climatiques à un horizon de 30 ans et au-delà.

Ces deux exercices (prévisions saisonnières et projections climatiques) ne requièrent pas le même niveau de fiabilité que le processus opérationnel de la PNT. À ce titre, les modèles sont exécutés ou bien sur la seconde machine de Météo France (machine de secours) ou bien en collaboration avec le CERFACS (Toulouse) ou d'autres centre de recherche et développement sur le climat.

## 2.3 Nature de l'investissement et bénéfices attendus

### Nature de l'investissement

Actuellement, la PNT est effectuée sur les machines ATOS Sequana XH2000 de capacité de calcul cumulée théorique de 20 PetaFlops. Ces deux supercalculateurs ont été livrés à Météo France en 2020 à l'issue d'un renouvellement instruit en 2016. La Figure 1 illustre l'évolution des capacités de calcul de l'établissement depuis l'année de sa création en 1992.

Comme c'était le cas en 2016, **l'investissement proposé actuellement consiste en différentes possibilités d'augmentation de la capacité de calcul de Météo France et non pas en l'acquisition d'une machine présentant des caractéristiques architecturales précises.**

En effet, le dossier d'évaluation socio-économique est construit en considérant comme fixé tous les autres facteurs influençant la qualité de la prévision (systèmes de mesures, assimilation des données, modélisation de l'atmosphère, algorithmes numériques). Ainsi, les seuls facteurs permettant de jouer sur une amélioration de la PNT sont le maillage et le nombre de membres. La contrainte opérationnelle d'exécution en moins de 1H30 établit alors un lien mécanique entre réduction du maillage, augmentation du nombre et besoin en capacité de calcul supérieur.

Par ailleurs, l'investissement considéré met en regard de chaque niveau d'augmentation de capacité de calcul l'adaptation du système hébergeant les futurs nouveaux supercalculateurs (consommations électriques, réseau informatique, le stockage, les outils de pré- et post-processing).

Le cycle quinquennal d'investissement de Météo France est conforme aux pratiques du secteur des utilisateurs des supercalculateurs, comme c'est le cas dans des institutions comme le CEA, GENCI ou des grandes entreprises comme EDF et TotalEnergies. L'amélioration des performances des processeurs aussi bien terme de calcul que de consommation énergétique conduit à une obsolescence rapide des machines. Par ailleurs, les délais de mise en place des appels d'offres pour ces machines conduisent à les renouveler sur une période de 5 ans.



**Figure 1 - Evolution de la capacité de calcul de Météo France pour la prévision numérique du temps de 1992 à 2021. Source: Météo France.**

### Bénéfices attendus

De nombreux secteurs de l'économie dépendent des conditions météorologiques : l'agriculture, la production d'électricité, les transports aérien, terrestre et maritime, la grande distribution, les activités touristiques mer et montagne, pour ne citer quelques uns. Toutefois, les bénéfices socio-économiques estimés dans cette étude ne peuvent porter que sur les gains que produirait la seule augmentation des capacités de calcul de Météo France.

Comme le souligne le document d'évaluation, la quantification des effets socio-économiques induits par cette augmentation est un problème difficile. En effet, la matérialisation de ces gains

est le résultat d'une chaîne causale qui va des prévisions météorologiques aux décisions des acteurs économiques en passant par leur usage de l'information.

Toutefois, il est possible de résumer cette longue chaîne à deux conditions qui doivent être réalisées pour que l'augmentation de la capacité de calcul conduisent à des gains sociaux économiques incrémentaux :

1. l'augmentation de capacité de calcul induit une amélioration significative de la qualité des prévisions
2. l'amélioration des prévisions est suffisamment importante pour permettre aux acteurs économiques de prendre de meilleures décisions.

Météo France dispose de données historiques sur la qualité de la prévision et d'analyses ex post permettant de mettre en regard leur évolution avec les changements de configuration de calcul. Un exemple de ces historiques est donné par la Figure 2. Cette figure illustre l'évolution de la prévision des cumuls de pluie sur 6 heures fournies par le modèle AROME. La qualité des prévisions est mesurée à l'aide d'un score. Il s'agit du Heidke skill score qui compte la proportion de prévisions correctes par rapport à une prévision par persistance. Plus le score est élevé, plus cela signifie que la PNT fait mieux qu'un modèle naïf.

Sur ce graphique, on constate plusieurs faits.

Tout d'abord, entre 2010 et 2011, des progrès significatifs de la prévision des fortes pluies (10 mm) ont été obtenus grâce à des améliorations de l'assimilation de données et du domaine de calcul. Ensuite, on constate que la réduction de la maille de 2,5 km à 1,3 km effectuée en 2015 a permis de faire passer le score Heidke skill de valeurs oscillant entre 0,1 et 0,2 à des valeurs entre 0,3 et 0,4, amélioration est-elle due ou non au passage en 2015 au PetaFlops. Enfin, on constate que les performances de prévision varient au cours d'une période de même configuration de puissance de calcul. Ces variations sont dues aux conditions météorologiques plus ou moins difficiles à prévoir.

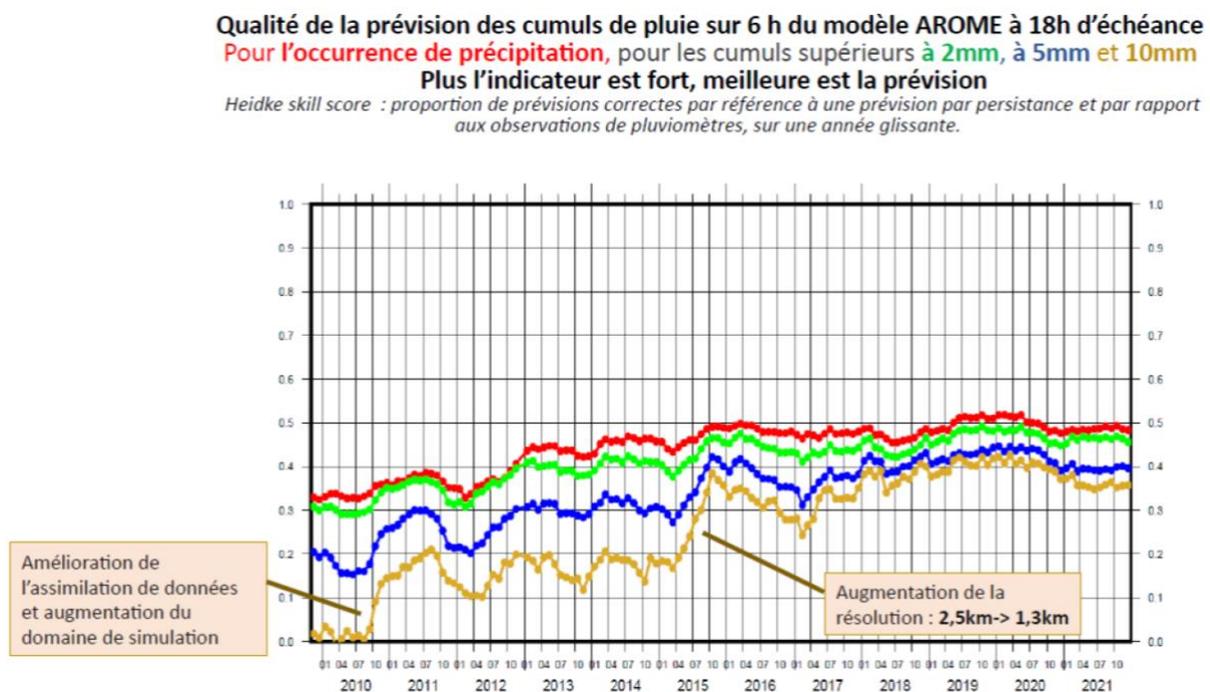


Figure 2 - Evolution des scores de prévision de cumul de pluie de 2010 à 2021. source: Météo France.

Ces observations sont faites pour mettre en avant trois points expliquant la difficulté de l'analyse socio-économique de l'investissement en capacité de calcul : l'amélioration de la PNT ne dépend pas que des capacités de calcul ; une augmentation de la capacité de calcul peut ou peut ne pas conduire à une prévision de meilleure qualité ; à configuration de puissance de calcul fixée, la performance de prévision varie.

Par ailleurs, comme nous l'avons écrit ci-dessus, l'amélioration de la qualité de la prévision est une condition nécessaire, mais non suffisante de réalisation de gains sociaux-économiques selon les secteurs. Même si l'augmentation de la puissance de calcul conduit à une amélioration des scores de prévisions statistiquement significative, cette dernière peut rester insuffisante pour conduire à une réduction des coûts pour certains utilisateurs de ces prévisions. On peut citer par exemple, l'amélioration des prévisions de gel à 24 heures dans une aire donnée. Cette même amélioration peut rester insuffisante pour permettre à un concessionnaire d'autoroutes de déterminer quel tronçon il doit sabler parmi la centaine qu'il doit gérer.

Pour cette raison, l'analyse socio-économique des bénéfices attendus par la hausse de la capacité de calcul doit s'effectuer secteur par secteur en considérant leur relation spécifique à la prévision.

### 3 Les différentes options d'investissement

Avant de décrire les différentes options d'investissement du projet (section 3.1), on rappelle les différents enjeux technologiques liés aux supercalculateurs et les différentes sources de coût liées à l'infrastructure de calcul.

#### **Enjeux technologiques majeurs : consommation énergétique et fiabilité**

La mise en œuvre de milliers de processeurs qui calculent en parallèle conduit à des consommations électriques très importantes, de l'ordre de 5 mégawatts pour les supercalculateurs actuels, dont le fonctionnement optimal dépend fortement des systèmes de refroidissement. Le défi principal est aujourd'hui celui de la maîtrise de la dissipation d'énergie. Il est indispensable de réduire la consommation électrique par opération<sup>2</sup>.

Le second défi concerne la fiabilité. La complexité croissante des architectures conduit à une réduction du temps moyen entre deux pannes. Elle est actuellement de quelques heures. Il est donc nécessaire de développer des codes qui permettent la reprise rapide des calculs en cas de panne, ou de permettre l'exécution de calculs dans un environnement dégradé, par exemple lorsque des maintenances affectent une partie de l'architecture.

#### **Les moyens de calcul et les coûts d'exploitation**

La production opérationnelle de Météo-France s'appuie sur des supercalculateurs et sur des systèmes d'acquisition de données, de bases de données et de pré- et post-traitements. Ces systèmes sont indispensables pour fournir l'ensemble des données d'entrée aux simulations numériques ainsi que pour exploiter les volumes de données produites par le calcul. Les flux de données entre ces systèmes et les supercalculateurs nécessitent d'avoir une liaison très haut débit (fibre optique) entre les équipements. Ceci est possible à un coût raisonnable lorsque les sites sont distants de quelques kilomètres. Le coût de la fibre optique est proportionnel à la distance de la connexion, celui-ci devient rédhibitoire pour des distances trop importantes (par exemple entre Toulouse et Paris). Les postes suivants contribuent au coût d'exploitation d'une machine de calcul intensif :

1. Les redevances HPC qui englobent l'achat ou la location des calculateurs, les frais d'installation (hors travaux d'infrastructure), l'accueil des équipes support du prestataire, ainsi que l'ensemble des services souscrits auprès du fournisseur lors de la passation du marché. La part du supercalculateur représente environ 40% de cette redevance. Depuis plusieurs années, Météo-France a fait le choix de privilégier la location de ses calculateurs.
2. Les capacités de stockage : Météo-France dispose actuellement d'un volume de stockage de 1200Po au total, dont 100Po de disque et 1100Po de bande magnétique. Le système de stockage est actuellement reparti sur 3 sites et principalement au CNC. La répartition actuelle des volumes de données est supposée inchangée : 85 % des volumes d'archivage occupés par les données de PNT (opérationnelle et recherche), les partenaires et les données diverses, et les 15 % restants étant utilisés pour des données de prévisions climatiques et les prévisions saisonnières.
3. Les actions de pré- et de post-traitements : des serveurs de pré-traitement sont utilisés pour fournir aux modèles numériques les données nécessaires en entrée (observations), ainsi que pour accueillir les données produites par ces modèles. Des serveurs de post-traitement sont nécessaires pour convertir, extraire, mettre en forme et visualiser les données. La prévision météorologique possède la particularité de reposer sur la production de données qui

---

<sup>2</sup> La consommation électrique par opération a été divisée par mille depuis les années 90.

deviennent rapidement « obsolètes » : ces données doivent ainsi être mises à jour plusieurs fois par jour (et conservées en règle générale entre 3 et 5 jours en accès rapide). L'accès aux données nécessite des solutions techniques adaptées aux différents cas d'utilisation (appui aux forces armées, données publiques vs. commerciales, etc.).

4. Le coût de réseau : les coûts récurrents des réseaux numériques augmentent faiblement avec les gains de puissance, mais demandent plus ou moins d'investissements selon l'option retenue.
5. Les coûts d'infrastructure : ce projet requiert de mener des travaux bâtimentaires afin d'accueillir les surfaces au sol plus grandes, des travaux sur les réseaux électriques et les équipements de refroidissement, et sur les réseaux numériques (connexions avec les implantations à l'Outre-Mer, connexions des prévisionnistes en région métropolitaine vers le système et connexions avec l'extérieur au sein du Regional Meteorological Data Communication Network).
6. Consommation énergétique : l'alimentation électrique nécessite une puissance de l'ordre de 5 MW. La consommation d'énergie est croissante, linéaire en fonction des différentes et représente 20% des coûts au tarif actuel de l'électricité.

### Les options d'investissement

Le dossier d'évaluation est construit sur l'unique critère de la puissance de calcul, mesurée par un facteur d'amélioration de la puissance actuelle. En d'autres termes, l'approche retenue est celle d'une évaluation différentielle, qui quantifie l'augmentation de puissance effective dans chacune des trois options par rapport à la puissance actuelle.

Le rapport d'évaluation tient compte de l'incertitude sur la date exacte de mise en service des supercalculateurs et du laps de temps nécessaire à ce que les gains de puissance espérés soient effectifs (portage), les gains socioéconomiques ne sont pris en compte qu'à partir de 2026.



Le modèle de coût proposé dans le document correspond aux différents postes qui contribuent au coût d'exploitation et sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Facteur de gain	Redevance HPC	Pré-post traitement	Stockage	Réseau	Conso énerg.	Infrastructure (travaux, etc.)	TOTAL
x1	21	9	14	9	9	2	<u>64</u>
x3	65	22	46	7	25	2	<u>167</u>
x6	128	43	86	10	54	8	<u>329</u>
x12	253	87	172	20	108	8	<u>648</u>

### 3.1 Méthode de constructions des options

Les options d'investissement correspondent à des options d'accroissement de la puissance effective, à l'exception de l'option dite **de référence** ou **contrefactuel**, qui est définie comme le renouvellement des supercalculateurs à puissance constante. Ces options procèdent du constat que la « hausse de la puissance de calcul à horizon 2025, au moment de la fin de vie des supercalculateurs actuels, apparaît nécessaire pour que l'établissement puisse continuer à offrir des services, au meilleur niveau mondial correspondant à l'état de l'art scientifique et technique ».

À chacune des trois options de gains sont associées des améliorations techniques qui portent sur certains paramètres (résolution de la maille, résolution verticale de l'atmosphère, nombre de scénarii de prévision) des modèles de prévision numérique du temps ou de prévision saisonnière AROME et ARPEGE. Il faut noter que seule la résolution verticale est une amélioration technique commune à toutes les options de projet (voir Tableau 1 ci-après). Pour préparer ses outils opérationnels aux nouvelles architectures de calcul, Météo-France travaille à la nécessaire mutation des codes de ses modèles numériques, dans le cadre d'une coopération européenne.

#### **Des simulations ciblées et plus fines**

Le besoin d'augmenter la puissance de calcul se justifie par la volonté d'améliorer la résolution des modèles de prévision, et en particulier de mieux représenter les phénomènes à fort impact, de consolider l'approche probabiliste (la variabilité des prévisions augmentant avec la résolution spatiale et temporelle), mais aussi pour permettre d'intégrer et d'assimiler un nombre croissant d'observations de façon optimisée pour alimenter les prévisions.

En effet, mieux prédire les phénomènes extrêmes et produire une meilleure analyse de leurs impacts nécessite d'assimiler un nombre croissant d'observations issues de nouveaux satellites et de nouvelles sources de données, de généraliser la prévision probabiliste et encore de valoriser l'intelligence artificielle, et donc de disposer d'une puissance de calcul accrue.

L'amélioration de la prévision du temps et du changement climatique requiert une représentation plus fine de l'environnement. Cela suppose de mieux comprendre le système terre et les interactions entre ses différentes composantes (atmosphère, surfaces continentales, océans, et cryosphère). Pour cela, un modèle composite régional unifié du système Terre, de résolution kilométrique est nécessaire.

Les facteurs de gain de puissance de calcul effective doivent permettre des PNT plus précises géographiquement et dans le temps. La taille de maille a donc un impact direct sur le temps de calcul nécessaire à la PNT.

Pour tenir compte de ces différents objectifs, Météo-France a élaboré trois options de gains de puissance différenciées.

Modèle météo	Indicateurs	x1	x3	x6	x12
<b>ARPEGE - modèle global</b>	<b>Résolution (horizontale)</b>	5 – 24 km	3 – 15 km	2,5 – 12 km	3 – 15 km
	<b>Niveaux (verticale)</b>	105	120	Idem option x3	Idem option x3
	<b>Membres (par instance de calcul), nombre d'instance par jour, échéances</b>	35, 4x/j, échéances : 6h-4j	Idem option x1	Idem option x1	Idem option x1
<b>AROME – modèle limité avec ses sous-modèles</b>	<b>Résolution (horizontale)</b>	<u>Général</u> : 1,3 km <u>PE-OM</u> : 2,5 km	<u>Général</u> : 850m <u>PE-OM</u> : 2 km	<u>Général</u> : 750m <u>PE-OM</u> : 1,9 km	<u>Général</u> : 500m <u>PE-OM</u> : 1,3 km
		<u>PI</u> : 500 m sur quelques zones	<u>PI</u> : 500 m sur quelques zones supplémentaires	<u>PI</u> : 500 m sur la métropole entière	<u>PI</u> : 500 m sur la métropole entière
	<b>Niveaux (verticale)</b>	90	120	120	120
	<b>Membres, fréquence, échéance par variante d'AROME</b>	<u>PEARO</u> : 17 membres, 4x/j, 3h-2j d'échéance <u>PE-OM</u> : 16, 2x/j, 3h-2j <u>OM</u> : 1, 4x/j, 3h-2j  <u>PI</u> : 24x/j, 0-6h <u>Commercial</u> : 1 membre, 5x/j <u>DEF</u> : 1 membre, 4x/j	<u>PEARO</u> : 25 membres 4x/j, 3h-2j d'échéance <u>PE-OM</u> : 16, 4x/j, 3h-2j <u>OM</u> : 1 petit domaine, 4x/j, 3h-2j <u>PI</u> : 24x/j, 0-6h <u>Commercial</u> : 1 membre, 6x/j <u>DEF</u> : idem option x1	<u>PEARO</u> : idem option x3  <u>PE-OM</u> : idem option x3 <u>OM</u> : idem option x3  <u>PI</u> : 24x/j 26 membres 0-6h <u>Commercial</u> : idem option x3  <u>DEF</u> : 1 membre, 5x/j	<u>PEARO</u> : idem option x3  <u>PE-OM</u> : idem option x3 <u>OM</u> : idem option x3  <u>PI</u> : idem option x3, mais 500 m <u>Commercial</u> : 1 membre, 8x/j  <u>DEF</u> : 1 membre, 7x/j

Tableau 1- Caractéristiques techniques des modèles ARPEGE et AROME dans les différentes options de renouvellement. source Citizing pour Météo France (2021).

### 3.2 Description des trois options retenues

Comme mentionné ci-dessus, l'option de référence a été définie comme le renouvellement des supercalculateurs à puissance constante, et son coût a été chiffré à **64,3 M€** par la Direction des Systèmes Informatiques (voir tableau ci-après). Cet investissement représente un budget divisé par deux par rapport à aujourd'hui et en moyenne sur 5 ans.

La première option consiste à renouveler les supercalculateurs avec un budget d'exploitation de l'ordre de **167M€**, en légère hausse par rapport à la situation actuelle, soit 30 M€ par an contre 25 M€ en moyenne sur la période 2020-2025. Ce budget permet d'envisager une hausse de puissance d'un facteur 3 (environ 60 pétaflops).

La deuxième option représente un budget double de celui de l'option 1, soit **329M€**, pour un facteur de gain de puissance de calcul estimé de 6.

La troisième option prévoit une puissance de calcul multipliée par 12 pour un budget multiplié par 4 environ, à **648M€**.

Les tableaux suivants reprennent les estimations de gains de puissance effective attendus pour chacune des options.

Libellé de l'option étudiée	Hausse de puissance par rapport au contrefactuel	Coût total de l'option	Delta de coût par rapport au contrefactuel
Contrefactuel		64 M€	
Option 1	X 3	167 M€	+ 103 M€
Option 2	X 6	329 M€	+ 265 M€
Option 3	X 12	648 M€	+ 584 M€

Il convient de rappeler deux éléments d'importance pour la compréhension de ces chiffres :

- Le delta de coût par rapport au contrefactuel (colonne de droite) n'est pas le delta de coût par rapport au budget actuel des supercalculateurs (qui s'élève à environ 25M€ par an, soit 150M€ sur 6 ans). En effet, le contrefactuel, qui correspond à un renouvellement des supercalculateurs à puissance constante, bénéficie de gains techniques permettant d'abaisser le coût total par rapport aux supercalculateurs actuels.
- Le coût socio-économique qui sera pris en compte dans l'évaluation objet de ce rapport, intègre un coût d'opportunité des fonds publics (COFP). Ce dernier désigne à la fois la rareté des fonds publics et donc les nécessaires arbitrages budgétaires ; et le coût de prélèvement de l'argent public auprès des contribuables.

Météo-France attache une importance primordiale aux améliorations techniques corollaires des options proposées, puisque celles-ci impactent directement la prévision numérique du temps et les prévisions saisonnières et études du climat. Ces améliorations escomptées sont collationnées dans plusieurs tableaux, desquels nous pouvons retenir les éléments suivants :

- Option 1 : multiplication de la puissance de calcul par un facteur 3.

L'accent est mis sur une amélioration modérée, mais uniforme des caractéristiques (résolution horizontale, résolution verticale, augmentation de la fréquence). Les bénéfices sont relativement modestes tout comme l'augmentation de la puissance de calcul.

- Option 2 : multiplication de la puissance de calcul par un facteur 6.

Elle permet des améliorations notoires en prévision immédiate : résolution à 500 mètres / métropole, 26 scénarios de prévision toutes les heures sur l'intervalle d'échéances 0-6h, prévisions probabilistes aux échéances de la prévision immédiate, et aux échéances 2 à 4j, prévision d'ensemble ARPEGE de résolution 2,5km permettant une amélioration notoire de la représentation des systèmes orageux.

- Option 3 : multiplication de la puissance de calcul par un facteur 12.

Cette option est la plus ambitieuse, et se distingue essentiellement de l'option 2 par la haute résolution (500m) à toutes les échéances d'AROME et pour tous les domaines. Elle permet d'améliorer les résolutions spatiales des prévisions, d'assimiler plus de données et améliore significativement les composantes de modélisation climatique régionale en métropole et en outremer. Elle permet en outre de mieux quantifier les aléas d'événements intenses à fréquence très rare dans les modèles saisonniers.

## 4 Évaluation socio-économique par secteur

Dans cette section, nous présentons un résumé des estimations des bénéfices socio-économiques (section 4.1) avant de décrire les évaluations obtenues dans les différents secteurs de l'économie analysés par secteur par secteur dans l'étude de Citizing pour Météo France [1]. Nous détaillons la première de ces estimations (section 4.2 Sécurité des biens et des personnes) pour faire ressortir la méthode. Les évaluations suivantes reprenant le même canevas, nous nous contentons de résumer les points saillants.

### 4.1 Principes et résumé des évaluations

Chaque secteur de l'économie est affecté de façon différente par les phénomènes météorologiques. Pour chacun des secteurs analysés de l'économie, l'évaluation socio-économique des bénéfices attendus consiste à rassembler les éléments suivants :

1. l'effet de la météo sur l'activité du secteur
2. l'amélioration de la prévision attendue
3. l'effet spécifique de l'amélioration de la prévision sur le secteur
4. la valeur unitaire d'un coût évité par l'amélioration de la prévision.

Par ailleurs, les gains socio-économiques sont mesurés par différence par rapport à un scénario de référence sur la période 2025-2030. Comme décrit dans la section 3.1, le scénario de référence choisi est celui dans lequel la puissance de calcul de Météo France est maintenue à l'identique. Toutefois, malgré ce maintien à l'identique de la capacité de calcul, le scénario de référence projette une amélioration de la qualité des prévisions issues du précédent investissement instruit en 2016 et livré en 2020.

À ce scénario de référence, l'étude adjoint un scénario tendanciel de l'évolution du secteur. En effet, sur la période concernée 2025-2030, la fréquence des phénomènes météorologiques est susceptible d'évoluer du fait du changement climatique. De même, des facteurs autres que la météorologie sont aussi susceptibles d'affecter la dépendance du secteur à ces événements.

De ce point de vue, l'étude met en œuvre une analyse socio-économique méthodique, cohérente et fondée sur des hypothèses chaque fois explicites.

Nous résumons dans le tableau ci-dessous les gains socio-économiques estimés dans les différentes options pour les différents secteurs par une amélioration de la PNT et des projections climatiques.

Secteur	Option x3	Option x6	Option x12
SPB	229,7	445,2	592,3
Santé	175,1	305,4	525,4
Énergie	24,02	24,02	59,68
Agriculture	15,1	62,9	27,3
Aviation civile	37	183,5	238,9
Transport terrestre	1,29	5,71	7,01
Distribution	1,33	1,99	3,32
Fournisseurs de services météo	0,56	1,71	2,88
Constructeurs supercalculateur	5,21	13,48	29,76
<b>Total PNT</b>	<b>489,31</b>	<b>1043,91</b>	<b>1486,55</b>
Projection climatique	298,6	373,3	448
<b>Total gains socio-économiques</b>	<b>787,9</b>	<b>1417,2</b>	<b>1934,6</b>

Tableau 2 - Gains socio-économiques de la PNT par secteur et de la projection climatique. Montants exprimés en M€ constant.

## 4.2 Sécurité des personnes et des biens

### Résumé - SPB

La SBP représente un coût pour la collectivité de l'ordre de 4 Md€ par an. Les gains attendus par le projet sont issus d'une réduction du coût des dommages par une amélioration de la détection des événements dangereux. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de 229 M€, 445 M€ et 592 M€.

L'ordre de grandeur des gains estimés nous paraît crédible au regard de l'enjeu économique du secteur et de la place de la prévision dans les décisions des acteurs. Nous recommandons toutefois d'améliorer la différenciation des scores de détection entre les scénarios par l'usage d'études ex post fondées sur les données historiques dont dispose l'établissement. Cette remarque s'applique également à la relation entre détection et dommages évités.

La sécurité des personnes et des biens (SPB) concerne l'exposition de l'économie aux événements météorologiques Tempêtes, Grêles, Neige (TGN) ainsi qu'aux catastrophes naturelles (Cat-Nat) correspondant aux inondations et sécheresses. Elle recouvre également les feux de forêt. Pour donner un ordre de grandeur, les sinistres au titre des TGN et des Cat-nat ont représenté un montant de 4 Md€ en 2019 ; quant aux feux, ils causent la destruction d'une moyenne de 11 000 ha de forêt par an.

Dans le cas des TGN et des Cat-Nat, l'approche choisie pour évaluer les gains du projet se fonde sur la possibilité de réduire les dommages induits par ces phénomènes météorologiques dangereux par une amélioration de leur détection. Une détection anticipée permet de mettre en œuvre des moyens adaptés de protection de la population et des biens par le déclenchement des Vigilances Orange et Rouge. L'étude suppose alors que par rapport au scénario de référence et tendanciel, les différentes options d'augmentation de puissance de calcul conduisent à 1 point de plus dans l'option x3, 2,5 points de plus dans l'option x6 et 4,5 points de plus dans l'option x12. Le scénario tendanciel tient compte d'une augmentation probable des événements TNG liés au changement climatique.

En ce qui concerne les feux de forêt, l'étude projette les surfaces brûlées en appliquant un taux de croissance tenant compte d'une tendance haussière liée au changement climatique. La valeur de l'hectare de forêt est tirée d'une étude économique donnant une valeur de 11 k€, valeur intermédiaire entre les revenus issus de l'exploitation forestière et de la dépense par hectare pour son maintien. Par ailleurs, l'évaluation considère qu'une meilleure prévision des vents permet une réduction des dégâts des feux grâce à une meilleure organisation de la lutte anti-incendie. L'étude suppose un gain de 8% dans la précision de la prévision des vents dans l'option x12. Elle suppose de plus que ce gain dans la qualité de la prévision se traduit par un gain annuel de 2,17% de surfaces épargnées par le feu.

Les estimations effectuées sur la base de ces hypothèses sont correctes pour les SPB et les feux de forêt. Toutefois, trois hypothèses nous paraissent discutables :

1. les gains sur la détection,
2. le prolongement du scénario tendanciel à partir de 2020,
3. la relation entre la détection améliorée des événements TNG et les dommages évités.

### Gains sur la détection

Les trois options d'investissement précisent les effets techniques en matière de maillage de l'espace et de traitement du nombre de membres. En revanche, l'étude ne fournit pas d'éléments permettant de mettre en regard les améliorations techniques des modèles et l'amélioration des scores des prévisions. Comme il nous l'a été précisé au cours des entretiens avec Météo France, les scores de prévisions ne sont pas une fonction élémentaire du maillage de l'espace.

Toutefois, l'étude ne fournit pas d'éléments permettant de comprendre comment est construite l'hypothèse que l'option x3 conduirait à une augmentation de 20% du score de prévision des événements TNG (de même pour les augmentations dans les deux autres options). En particulier, il n'est pas fait référence au gain de scores Heidke observé en 2015 à l'occasion d'une augmentation de la capacité de calcul ayant permis de diviser par deux la maille horizontale.

### Prolongement du scénario tendanciel

Pour des raisons de simplicité et de clarté de l'évaluation socio-économique, le choix a été fait d'appliquer un taux de croissance linéaire à la valeur initiale des dommages aux particuliers de 2020. Cette hypothèse nous paraît conduire à majorer les dommages. L'historique montre une variation allant de 0,4 Md€ à 1,4 Md€ avec une moyenne plutôt proche de 0,7 Md€.

### Relation détection - dommage

En ce qui concerne la relation entre la détection des événements TNG et les dommages évités, on regrette que l'étude ne fasse pas un état de l'historique des détections et qu'il ne soit pas mis en regard des dommages constatés. Météo France dispose de données à la fois historique et spatiale sur les alertes Vigilance. Mise en relation avec les données de versement d'indemnités d'assurance, cette masse de données pourrait révéler la place de la prévision dans les dommages évités.

Par ailleurs, un entretien avec une compagnie d'assurance interrogée au cours de cette mission de contre-expertise a permis de clarifier la place de la prévision dans la capacité de réduction des dommages. Cet assureur a mis en place un système d'alerte SMS de ses clients sur les risques d'inondations pour leur permettre, par exemple, de mettre leur véhicule à l'abri de la zone concernée. Bien qu'il ait des retours clairs de satisfaction pour ce service, il ne lui a pas été possible de mettre en regard les alertes et une baisse des dommages.

La relation entre détection des phénomènes météorologiques dangereux et dommages évités nous paraît suffisamment importante pour faire l'objet d'études spécifiques permettant de fonder les effets quantitatifs des prévisions.

Cette remarque s'applique également à la relation entre la précision des prévisions de vent et l'action des opérationnels du feu permettant de réduire les surfaces brûlées.

### 4.3 Santé

#### Résumé - Santé

L'effet du climat sur la santé se manifeste au travers d'une surmortalité induite par les événements climatiques extrêmes, comme les canicules, et par les pollutions aux particules fines. Les gains attendus par le projet sont issus d'une réduction de cette surmortalité par une amélioration des plans Canicules et de prévention des populations face aux pics de pollution. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de 175 M€, 305 M€ et 525 M€.

L'estimation globale des gains est prudente et tend à minorer les bénéfices attendus par la PNT sur la santé. La différenciation entre les scénarios nous paraît plus difficile à appréhender du fait du haut niveau de performance déjà atteint par les plans de prévention.

Dans le secteur de la santé, l'étude analyse deux sources potentielles de bénéfices socio-économique induits par l'amélioration de la PNT. La première concerne les canicules et la seconde les pollutions atmosphériques chroniques.

Dans le cas des canicules, l'évaluation économique se fonde sur les gains d'efficacité des plans Canicule permettant une réduction de la surmortalité imputable aux vagues de chaleur. Deux facteurs agissent en sens contraire sur les gains potentiels : l'augmentation tendancielle des occurrences des canicules à l'horizon 2030 dues au réchauffement climatique et une efficacité déjà significative des plans Canicule. En effet, ces événements météorologiques sont d'une prévisibilité et d'une détection plus importantes que d'autres. De ce fait, une projection modeste d'augmentation de l'efficacité des plans Canicule est supposée. Partant d'une efficacité projetée de 81% de surmortalité évitée sur 2025-2030 dans le contrefactuel, l'étude suppose un gain de 0,5 point par options du projet (de 81,5% dans l'option x3 à 82,5% dans l'option x12). Toutes les tranches d'âge n'offrant pas la même vulnérabilité à ces événements, la valeur de l'impact est mesurée en nombre d'années de vie sauvées.

Dans le cas des pollutions chroniques aux particules fines, l'approche choisie consiste à estimer les gains induits par une amélioration de la prévision des vents conjuguée à un effet d'information de la population. Les gains sur la prévision des vents sont estimés à 8% dans l'option x12, 5% dans l'option x3 et 4% dans l'option x3. Par ailleurs, le système d'information des autorités et de la population en cas de formation de pollution atmosphérique étant déjà bien développé en France, des gains également modestes de 0,7% sont supposés dans la surmortalité évitée dans l'option x12. Ce gain est ventilé proportionnellement dans les deux autres options.

Les évaluations de gain socio-économiques effectuées sur la base de ces hypothèses dans le secteur de la santé sont correctes. Par ailleurs, les hypothèses retenues aussi bien pour l'évolution tendancielle des événements météorologiques considérés que pour les facteurs de gains sont prudentes et tendent à minorer les gains potentiels.

Toutefois, la différenciation des effets entre les options nous paraît plus difficile à fonder. L'hypothèse de linéarité dans la répartition des effets entre les trois options a le mérite de la lisibilité. Cependant, elle nous paraît surestimer la capacité des prévisions à fournir des effets significativement différents dans des secteurs où leurs couplages avec les plans de protection ont atteint déjà un haut niveau de performance.

#### 4.4 Défense

Le caractère confidentiel des activités de PNT pour la Défense n'a permis d'inclure ce secteur dans l'évaluation socio-économique.

#### 4.5 Énergie

##### **Résumé - Énergie**

Les consommations d'électricité et de gaz sont fortement sensibles à la température en France. Les gains attendus par le projet sont issus d'une meilleure gestion des réserves hydrauliques grâce aux prévisions saisonnières. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de 24 M€, 24 M€ et 59 M€.

L'estimation des gains obtenus par une amélioration de la PNT dans le secteur électrique nous paraît sous-estimée. Elle n'est pas en ligne avec la place que ce secteur représente dans l'activité commerciale de l'établissement. Un entretien avec un grand producteur d'électricité indique que la PNT à l'horizon court-terme et hebdomadaire contient encore un important gisement de création de valeur.

L'étude rappelle l'importance des conditions météorologiques dans la production et la consommation d'électricité. La consommation électrique en France est fortement thermosensible. Par ailleurs, une part importante de la production d'électricité dépend des conditions météorologiques : la pluviométrie pour la production hydroélectrique, l'ensoleillement pour la production solaire et la vitesse des vents pour la production éolienne.

Dans le secteur de la production d'électricité, la méthode d'évaluation des gains économique se concentre sur l'apport des prévisions saisonnières dans l'optimisation de la gestion des grandes réserves hydrauliques en France. L'étude projette une hausse modeste du productible hydraulique sur la période 2025-2030.

Par ailleurs, l'analyse se fonde sur les résultats d'une étude académique réalisée sur un barrage aux Etats-Unis montrant des gains de gestion induits par l'utilisation des prévisions saisonnières. L'analyse fait l'hypothèse que les acteurs se saisissent des prévisions saisonnières. Elle extrapole les résultats de l'étude académique au parc français pour estimer un gain de 1% dans les revenus des producteurs hydroélectriques dans l'option x3 et x6 et un gain de 1,5% dans l'option x12. La valeur de la production hydraulique est tirée des estimations des coûts de production d'hydroélectricité effectuée par la CRE (Commission de Régulation de l'Énergie).

Les faits rappelés dans l'étude socio-économique sur la place qu'occupe la météorologie dans le secteur de la production électrique sont tous pertinents. Il nous semble que le choix du domaine où chercher la création de valeur induite par les améliorations de la PNT est loin d'être le plus adapté.

Un entretien conduit avec la Direction de l'Optimisation de la Production à EDF a permis de nous éclairer sur l'usage des différentes prévisions dans la gestion de production d'électricité.

Tout d'abord, l'entretien confirme l'importance des prévisions météorologiques dans le processus de décision opérationnel de production. EDF dispose d'un ensemble de prévisions et des moyens de les traiter dans leur ensemble pour en déduire les prévisions de demande et de production les plus fiables possibles.

Toutefois, dans ce processus, les prévisions saisonnières ne présentent pas un caractère de fiabilité ou d'information suffisant pour être prises en compte dans la gestion des grandes réserves hydrauliques.

Par ailleurs, il nous a été fait part des améliorations des prévisions météorologiques les plus attendues par les opérationnels de la production. Elles portent sur les prévisions d'ensemble à

l'horizon hebdomadaire et sur la prévision des vents à 10m. Dans le premier cas, une amélioration significative des prévisions d'ensemble permettrait de mieux placer certains arrêts de groupe pour maintenance. Chaque placement inapproprié conduit à devoir démarrer un groupe de production plus coûteux et donc induit un coût social. Dans le second cas, une plus grande fiabilité dans les vitesses de vents en prévision immédiate permettrait une meilleure coordination avec les groupes de production à l'horizon de la journée. L'entretien évoque dans les deux cas un enjeu annuel de l'ordre de la dizaine de M€.

Le secteur de l'électricité est un domaine dans lequel les progrès des prévisions se matérialisent le plus directement et en particulier, aux horizons les plus courts termes de la journée et de la semaine. Bien que le secteur choisi par l'étude ne nous paraisse pas le plus pertinent, il nous semble que les gains espérés restent malgré tout sous-estimés. Ces gains ne reflètent pas la place que représente ce secteur dans l'activité commerciale de l'établissement.

#### 4.6 Agriculture

##### **Résumé - Agriculture**

L'agriculture est un secteur fortement climato-dépendant. Les gains attendus par le projet sont issus d'une réduction des pertes en engrais par une meilleure prévision des pluies et une réduction des dommages induits par les événements TGN par leur détection anticipée. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de 15 M€, 63 M€ et 27 M€.

L'estimation des gains obtenus dans le secteur agricole est fondée sur des hypothèses prudentes de valeurs des dommages évités. Elle nous paraît sous-estimer les effets bénéfiques potentiels dans des cultures particulières (vignobles, arbres fruitiers...). La différenciation entre les scénarios nécessiterait une explication du fait que les évaluations ne sont pas croissantes avec l'augmentation de puissance.

Le secteur de l'agriculture est un secteur économique fortement dépendant du climat. La valorisation des prévisions météorologiques pour ce secteur s'effectue selon deux axes : l'optimisation des traitements de sols et l'optimisation des rendements.

En ce qui concerne l'optimisation des traitements des sols, l'étude met en avant les phénomènes de lessivages et de volatilisation des engrais dispersés épendus sur les cultures. Ces phénomènes nuisent à l'usage optimal d'engrais coûteux et réduisent les rendements agricoles. L'agriculteur suffisamment bien informé des conditions météorologiques dans la zone de son exploitation peut optimiser l'usage des engrais et réduire les pertes. Par ailleurs, l'étude tient compte des coûts environnementaux liés à l'usage des engrais et

des hypothèses sont faites dans les différentes options sur la réduction des pertes en engrais induites par une meilleure prévision de température et d'hygrométrie à cinq jours. Dans le contrefactuel, il est supposé que 5% des traitements de sol sont perdus. Dans l'option x3 et l'option x12, il est supposé que l'amélioration des prévisions météorologiques permet de réduire de 2% ces pertes. Dans l'option x6, il est attendu une réduction de 10%.

En ce qui concerne l'optimisation des récoltes, l'approche de valorisation consiste à estimer les dommages évités sur les récoltes par les événements de type TGN. L'étude fait l'hypothèse d'une hausse tendancielle des dommages aux cultures induits par le changement climatique. Elle considère une augmentation de la fiabilité des prévisions TNG à échéance 3 jours de respectivement 4, 8 et 10% selon les trois options de renouvellement. Cette amélioration des prévisions est supposée permettre d'éviter respectivement 2, 4 et 5% de perte de rendement agricole.

Les évaluations fondées sur ces hypothèses sont parfaitement correctes. De plus, les axes choisis pour estimer la valeur créée par la prévision nous paraissent pertinents. Les gains liés à la protection des récoltes face aux événements de type TNG nous paraissent une sous-estimation prudente. La prévision peut permettre à d'autres types de culture de mettre en œuvre des protections en case d'alerte grêle ou givre (les vignobles).

Toutefois, la distinction des trois options dans le cas de l'optimisation des traitements demanderait une justification du fait qu'il s'agit d'un cas unique dans le rapport où l'option x12 produit moins de gain que l'option x6. Le seul facteur permettant d'expliquer cette particularité serait la résolution horizontale meilleure du modèle ARPEGE dans l'option x6 que dans les options x3 et x12 (de 2,5 à 12 km contre 3 à 15 km).

#### 4.7 Aviation civile

##### **Résumé - Aviation civile**

L'aviation civile est un secteur particulièrement dépendant de la météorologie au sol et dans l'atmosphère. Les gains attendus par le projet sont issus d'une réduction des pertes de temps en heure-passager par une meilleure prévision des orages et des vents, par des économies de fuel et de gaz à effets de serre par une optimisation des plans de vol en fonction des PNT. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de 37 M€, 183 M€ et 239 M€.

L'estimation des gains obtenus dans le secteur de l'aviation civile nous semble prudente et crédible aux vues de l'importance des PNT dans les décisions des acteurs de l'aviation.

L'aviation civile est un secteur particulièrement dépendant de la météorologie au sol et dans l'atmosphère. Les mauvaises conditions météorologiques sont responsables d'environ 15% des retards des vols en France.

L'approche retenue dans cette évaluation repose sur une estimation des heures de retard évitées par une meilleure prévision au sol des phénomènes de type orage et vent et sur une possible économie de carburant des transporteurs par une optimisation des plans de vols. Postulant une amélioration respectivement de 2%, 10% et 12% dans la prévision immédiate dans les options x3, x6 et x12, et compte tenu d'une valeur tutélaire du temps tiré du rapport Quinet (2013), des estimations sont tirées dans les trois options de renouvellement à partir du nombre d'heures de retard annuel d'environ 4,6 millions d'heures-passager.

Ces estimations restent prudentes et modestes au regard de l'importance du trafic aérien, qui conduisent à supposer un gain en temps de l'ordre de quelques dixièmes de pourcentage.

#### 4.8 Transport terrestre

##### **Résumé - Transport terrestre**

Les temps de trajet dans le transport terrestre dépendent des conditions météorologiques. Les gains attendus par le projet sont issus d'une réduction des pertes de temps, une réduction des consommations d'essence et d'émission de GES, par une augmentation du nombre de morts et d'accidentés grâce à une meilleure anticipation des événements TGN et verglas. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de 1 M€, 5 M€ et 7 M€.

L'estimation des gains obtenus dans le secteur du transport terrestre nous semble prudente et crédible. Elle minore probablement les gains potentiels dans le secteur du transport routier professionnel et du transport ferroviaire.

Le transport terrestre est également un secteur aussi affecté par les conditions météorologiques que son confrère le transport aérien.

L'étude reprend les mêmes hypothèses d'amélioration des prévisions des événements de type neige et verglas (2%, 10% et 12% d'amélioration dans les trois options respectives).

Elle fonde son évaluation sur les morts et les blessés évités dans les accidents de la route par une meilleure protection individuelle et collective (gestionnaire d'autoroute) contre ces risques d'accidents de la route. Elle comptabilise également les gains de temps permis dans les trajets terrestres par une meilleure anticipation des voyageurs de leur trajet.

Les morts et blessés évités sont valorisés en utilisant la valeur statistique de la vie humaine issue du rapport Quinet (2013). Le temps est valorisé à sa valeur tutélaire issue du même rapport.

Les bénéfices socio-économiques résultants sont d'un ordre de grandeur modeste dans le cas des morts et blessés évités (de l'ordre d'une vie et d'une dizaine de blessés évités par an) comme dans le cas des gains de temps (3 M€ dans l'option x12). Ces évaluations nous paraissent prudentes et sans doute sous-estiment les gains de la prévision météorologique en ne considérant que le transport passager. Elle ne tient pas compte de sa valeur pour le transport routier professionnel et le transport ferroviaire par des économies de temps issue d'une optimisation des trajets.

#### 4.9 Distribution

##### **Résumé - Distribution**

Les gains attendus par le projet dans le secteur de la distribution sont issus d'une analyse économique globale du secteur. Cette activité correspond aux commerces de détails de biens météo-sensibles, comme les glaces, les boissons rafraîchissantes, etc., activités pour lesquelles les délais de prévenance sont réduits. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de 1 M€, 2 M€ et 3 M€.

L'estimation des gains obtenus dans ce secteur répond au critère de prudence.

L'activité de distribution de biens météo-sensibles représente environ 88 Md€ (INSEE, 2020) de valeur ajoutée annuelle en France. Cette activité correspond aux commerces de détails de biens météo-sensibles, comme les glaces, les boissons rafraîchissantes, etc., activités pour lesquelles les délais de prévenance sont réduits. Du fait de la diversité des activités que recouvre le secteur de la distribution, l'évaluation des bénéfices d'une amélioration de la prévision météorologique se fonde sur des études académiques empiriques américaines reliant la prévision météorologique à la rentabilité des opérations de distribution. En effet, il est supposé qu'une meilleure prévision météorologique réduit les besoins de stockage des distributeurs et leur permet de produire le bon produit au bon moment.

De ce fait, l'étude suppose que l'effet de l'amélioration des prévisions dans les trois options se fera sentir directement sur l'excédent brut d'exploitation du secteur de la distribution. Les hypothèses modestes d'impact à l'horizon 2030 sont de 1,3% dans l'option x12, de 1,2% dans l'option x6 et de 1,1% dans l'option x3. Les gains économiques résultants restent suffisamment modestes dans les trois options pour répondre à un caractère de prudence dans l'évaluation.

#### 4.10 Activités des fournisseurs de services météo et fabrication de supercalculateurs

##### **Résumé - Fournisseurs de services météo**

Les gains attendus par le projet dans le secteur des fournisseurs de service météorologiques sont issus d'une projection des chiffres d'affaires du secteur en France. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de l'ordre 0,5 M€, 1,7 M€ et 3 M€.

L'estimation des gains obtenus dans ce secteur nous paraît minorer la valeur du marché des services de prévision météorologique, tel qu'elle ressort des entretiens avec l'établissement. La digitalisation de l'économie et le changement climatique sont deux facteurs qui poussent la dynamique du secteur à un rythme supérieur à celui supposé dans l'étude.

##### **Résumé - Fabricant de supercalculateurs**

La méthode d'évaluation des gains socio-économique préconise de tenir compte de l'ensemble des parties prenantes. L'étude comptabilise une part de la marge réalisée par le fabricant des supercalculateurs. Les trois options de renouvellement conduisent à des gains respectifs de l'ordre 5 M€, 13 M€ et 30 M€.

La prise en compte d'une part de la marge du producteur de supercalculateurs dans les bénéfices socio-économiques est correcte. Toutefois, le risque qu'aucune part de la marge du producteur n'intègre la valeur socio-économique créée devrait être considéré.

##### Activités des fournisseurs de services météo

Les prévisions météorologiques produites par Météo France constitue un bien rendu accessible à toutes les entreprises du secteur des services de prévision. Le marché des services à la prévision représente environ un chiffre d'affaires annuel de 60 M€, dont environ 30 M€ sont captés par Météo France. Une amélioration des prévisions issues des modèles de l'établissement bénéficie donc à l'ensemble des acteurs du marché.

Postulant une hausse du marché de la prévision allant de 1% dans le contrefactuel à 4% dans l'option x12, l'étude en déduit la valeur créée par les différentes options de renouvellement.

Si cette évaluation conduit à des bénéfices économiques modestes et prudents, leur imputation à l'augmentation de la capacité de calcul paraît plus difficile à mesurer. Des éléments sur la précédente hausse de capacité de calcul et ses effets sur le marché de la prévision permettraient de rendre plus tangible cette relation.

Par ailleurs, cette évaluation ne nous paraît pas alignée avec l'entretien réalisé avec la Direction Commerciale de l'établissement. Au cours de cet entretien, l'établissement a fait état d'une étude projetant des taux de croissance de l'ordre de 10% sur les prochaines années. Les hypothèses de croissance de chiffre d'affaires de Météo France sont calées sur des hypothèses de l'ordre de 2%. Il nous semble que ces dernières résultent moins d'une moindre dépendance de l'économie française au climat que de contraintes institutionnelles pesant sur l'établissement. En effet, étant donné ses projections d'effectifs, Météo France ne dispose pas de la capacité à suivre la croissance potentielle de ce secteur.

##### Fabrication de supercalculateur

Les principes d'évaluation des gains socio-économiques posés dans les Rapport Quinet (2013) et dans le rapport de France Stratégie (2017) demandent que l'ensemble des parties prenantes affectées par l'investissement soit considéré. Pour cette raison, l'étude considère les gains socio-économiques du constructeur du supercalculateur qui sera attributaire du marché de Météo France.

Postulant une marge de 5% sur le coût de l'investissement pour tenir compte du fait qu'une part importante des composants des supercalculateurs est fabriquée à l'étranger, l'étude estime des gains économiques de 5 M€, 13 M€ et 30 M€ dans les options x3, x6 et x12 respectivement. Ces gains sont supérieurs aux gains économiques attendus dans le transport routier et comparables aux gains attendus dans le secteur de l'agriculteur. Sans constituer le cœur de l'évaluation économique, ils en constituent une part non négligeable.

La prise en compte d'une part de la marge du producteur de supercalculateur dans les bénéfices socio-économiques est correcte. Toutefois, le risque qu'aucune part de la marge du producteur n'intègre la valeur socio-économique créée devrait être considérée.

#### 4.11 Projection climatique

##### **Résumé - Projection climatique**

Une part importante des bénéfices socio-économiques estimée par l'étude dans les trois options provient des projections climatiques. Elles sont respectivement de 298 M€, 373 M€ et 448 M€ sur des totaux de 788 M€, 1417 M€ et 1934 M€, soit 37%, 26% et 23%.

L'estimation des gains socio-économique des projections climatiques reposent sur une méthode complexe et un large ensemble d'hypothèses qui la rendent fragile.

L'évaluation des effets économiques du changement climatique étant par lui-même un sujet complexe, la question de la contribution d'un investissement particulier en supercalculateur dans la construction d'une connaissance commune du phénomène nous parait d'un niveau de difficulté qui mériterait une étude séparée des questions opérationnelles de la PNT.

Une part importante des bénéfices socio-économiques estimée par l'étude dans les trois options provient des projections climatiques. Elles sont respectivement de 298 M€, 373 M€ et 448 M€ sur des totaux de 788 M€, 1417 M€ et 1934 M€, soit 37%, 26% et 23%.

Ces évaluations se fondent sur des travaux académiques portant sur la valeur de l'information à disposer de projection climatique dans un délai de 10 ans en avance sur les capacités de réponses transitoires du climat à une hausse des gaz à effets de serre sur une certaine durée. Les bénéfices de cette information anticipée proviennent d'une réponse optimisée des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Les bénéfices estimés à l'échelle mondiale sont alors extrapolés par l'étude à l'échelle de l'économie française et ventilée sur les trois options du projet d'investissement.

L'estimation des gains socio-économique des projections climatiques reposent sur une méthode complexe et un large ensemble d'hypothèses qui la rendent fragile.

L'évaluation des effets économiques du changement climatique étant par lui-même un sujet complexe, la question de la contribution d'un investissement particulier en supercalculateur dans la construction d'une connaissance commune du phénomène nous parait d'un niveau de difficulté qui mériterait une étude séparée des questions opérationnelles de la PNT.

#### 4.12 Synthèse

L'ensemble des évaluations réalisées par secteur répondent aux critères de prudence pour éviter une surestimation des bénéfices attendus par l'investissement. On résume dans les Tableaux 1 et 2 suivants respectivement les différentes hypothèses faites dans l'amélioration des prévisions par secteur et les gains économiques attendus correspondant. Ces hypothèses couplées à une valeur unitaire du dommage ou du coût évité induisent mécaniquement les évaluations des bénéfices attendus des différentes options. Ces tableaux montrent que dans chaque secteur, les points de pourcentage de gain supposés restent toujours modestes par rapport au scénario contrefactuel.

**Tableau 3. Hypothèses d'amélioration des prévisions dans les différentes options, mesurées en points de pourcentage par rapport au scénario contrefactuel.**

Secteur	Prévision	x3	x6	x12
<b>SBP</b>				
Phénomènes TGN	Détection	1	2,5	4,5
Catastrophes naturelles	Détection	1	2,5	4,5
Feux de végétations	Vents	4	5	8
<b>Santé</b>				
Mortalité des canicules	Détection			
Pollution chronique de l'air	Vents	4	5	8
<b>Énergie</b>				
Gestion des barrages	Prév. Saison.	n. d.	n. d.	n. d.
<b>Agriculture</b>				
Traitement des sols	Pluie à 5 jours	n. d.	n. d.	n. d.
Récoltes	Détection TNG	4	8	10
<b>Aviation civile</b>				
Retards évités, carburant	Orages et vents	2	10	12
<b>Transport terrestre</b>				
Morts, blessés et dégâts matériels	Verglas	2	10	12
Gain de temps et GES évités	Prév. Im.	n. d.	n. d.	n. d.
<b>Distribution</b>				
Ventes météo-sensibles	Températures	n. d.	n. d.	n. d.

**Tableau 4. Hypothèses de gains économiques dans les différentes options exprimées en point de pourcentage par rapport au scénario contrefactuel.**

Secteur	Type de prévision	x3	x6	x12
<b>Sécurité des personnes et des biens</b>				
Phénomènes TGN	Détection	1	2,5	4,5
Catastrophes naturelles	Détection	1	2,5	4,5
Feux de végétations	Vents	1,08	1,36	2,17
<b>Santé</b>				
Mortalité des canicules	Détection	0,5	1	1,5
Pollution chronique de l'air	Vents	0,35	0,44	0,7
<b>Énergie</b>				
Gestion des barrages	Prév. Saison.	1	1	1,5
<b>Agriculture</b>				
Traitement des sols	Pluie à 5 jours	2	2	10
Récoltes	Détection TNG			
<b>Aviation civile</b>		2	4	5
Retards évités, carburant	Orages et vents	2	10	12
<b>Transport terrestre</b>				
Morts, blessés et dégâts matériels	Verglas	2	8	10
Gain de temps et GES évités	Prév. Im.	1,1	1,4	1,5
<b>Distribution</b>				
Ventes météo-sensibles	Températures	1,1	1,2	1,3

## 5 Méthode d'évaluation et stratégie de Météo France

Lors des entretiens avec Météo-France, des questions spécifiques ont permis de mieux appréhender la stratégie de renouvellement des supercalculateurs, le chiffrage des coûts d'infrastructure et opérationnels des options, et la nature des gains socio-économiques escomptés. Quels que soient les indicateurs et les éléments d'appréciation issus du rapport d'évaluation du renouvellement des supercalculateurs, il convient de replacer cet investissement dans le contexte des missions premières de Météo-France telles que définies par le contrat d'objectifs et de performance qui lie l'établissement à l'État.

Ce contrat stipule notamment que « la priorité de Météo-France est et restera la pleine mobilisation de l'expertise scientifique et technique de ses agents, de ses réseaux d'observation, de ses moyens de calcul intensif et, plus largement, de son infrastructure opérationnelle. Cet objectif permet d'apporter une contribution toujours plus utile en matière de prévisions météorologiques et d'informations climatique. En particulier, l'établissement contribue à la prévention des risques météorologiques afin d'apporter l'information la plus utile à ses clients et donneurs d'ordre (sécurité civile, armées, sécurité aérienne, collectivités, entreprises, grand public) ». De ces engagements qui reposent sur des objectifs à atteindre, selon quatre axes stratégiques, la stratégie de renouvellement des supercalculateurs doit se dessiner.

Dans ce cadre, l'évaluation socio-économique du renouvellement des supercalculateurs de Météo France met en œuvre les principes méthodologiques recommandés par le Rapport Quinet (2013) [3]. Par ailleurs, elle présente des analyses systématiques chiffrées des secteurs de l'économie météo-sensibles sur lesquels l'amélioration de la prévision est susceptible de produire des effets économiques. Les hypothèses sur lesquelles se fondent les estimations de création de valeur dans les différentes options sont toujours explicites. En ce sens, le rapport de Citizing pour Météo France [1] constitue une démarche exemplaire de l'évaluation des investissements publics.

En particulier, les arguments d'obsolescence mis en avant par l'étude pour justifier de la nécessité du renouvellement nous semblent parfaitement fondés. Par ailleurs, les nombreuses estimations opérées ainsi que les entretiens que nous avons eus avec des acteurs du secteur de l'énergie donnent un faisceau convergent d'arguments montrant l'existence d'un bénéfice socio-économique au l'augmentation des capacités de calcul de l'établissement.

Toutefois, plusieurs points nous paraissent mérités des compléments.

En premier lieu, le critère de renouvellement des supercalculateurs mesuré par la seule multiplication par un facteur de la puissance de calcul nous paraît lisible, mais réducteur.

En second lieu, si l'étude socio-économique produit un faisceau convergent montrant la création de valeur par l'augmentation des capacités de calcul, la différenciation des trois options entre elles est plus difficile à évaluer.

Enfin, le statut et les missions de l'établissement vis-à-vis de ses usagers institutionnels ont un effet sur la méthode avec laquelle les différentes options de renouvellement sont construites. Dans cette construction, la valeur créée pour les tiers autres qu'institutionnels n'est pas un aspect déterminant dans la stratégie de renouvellement des calculateurs.

De ce fait, nous développons dans cette section des pistes possibles de progrès pour permettre une amélioration de l'estimation de la valeur créée par un investissement du type requis par Météo France selon ces trois dimensions.

### 5.1 Le critère de puissance est lisible, mais réducteur

L'établissement a fait le choix de construire ses différents scénarios d'investissement sur la base d'un facteur unique qui est la puissance de calcul obtenue après renouvellement. Ce choix permet une lecture simple des différentes options. Toutefois, cette facilité de lecture occulte des aspects

des performances de l'infrastructure de prévision de Météo France qui ne sont pas le résultat de la seule puissance de calcul. Ce point peut s'illustrer par la livraison des deux derniers supercalculateurs de Météo France en 2021. Elle a conduit à un passage de la puissance de calcul de 5 à 20 PetaFlops, soit un gain d'un facteur 4. Ce sont les mois de travail d'adaptation des modèles qui ont permis d'obtenir le facteur 5 inscrit dans l'option médiane de l'étude de renouvellement réalisée en 2016.

Le choix du seul facteur de puissance ne permet pas non plus de différencier les risques entre les trois options. On décrit ci-après les aspects de la prévision qui sont directement impactés par la hausse de la puissance de calcul et ceux qui répondent à d'autres facteurs.

### **Le renouvellement est attendu et nécessaire pour maintenir la place internationale de Météo France**

Conformément aux pratiques en vigueur dans ce secteur technologique en évolution constante et rapide, l'actuel supercalculateur acquis en 2020 atteindra son niveau d'obsolescence technologique en 2025. On estime que les capacités de calcul et le gain de puissance théorique varient d'un facteur 10 à 100 sur une période de cinq ans.

L'établissement a analysé les caractéristiques techniques de l'équipement qui devra remplacer l'actuel supercalculateur. Par rapport à une configuration de base, contrefactuelle, correspondant au maintien de la puissance effective de calcul, trois options ou variantes ont été étudiées, définies chacune par un coefficient multiplicatif de la puissance actuelle de 3, 6 et 12, respectivement. L'investissement ainsi consenti est considéré comme rentable pour la société, car une meilleure prévision permet de réduire l'impact d'un phénomène météorologique sévère et d'optimiser quantité d'activités météo-sensibles<sup>3</sup>.

### **Les modèles de prévision constituent un atout de souveraineté à préserver**

Il faut souligner que la principale richesse de l'établissement réside dans la performance de ses codes de simulations, partagés avec ceux du CEPMMT, qui constituent une référence internationale en la matière. Ainsi, le code ARPEGE, modèle à aire planétaire fournissant une prévision des phénomènes de grande ampleur (dépression, anticyclone) à un horizon de quatre jours, est une singularité dans le paysage des centres de simulation ; les services nationaux européens qui n'en possèdent pas recourent aux données produites par le modèle du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Ce code peut donc être vu comme un atout stratégique, notamment pour les armées, qu'il convient de préserver. Les modèles AROME et ARPEGE fonctionnent par ailleurs en synergie, ce qui permet d'affiner les prévisions globales à échéance courte.

Sous l'impulsion du CEPMMT, les différents partenaires impliqués dans le développement logiciel sont engagés dans une nouvelle étape d'adaptation majeure de cet ensemble logiciel. Celle-ci vise à améliorer la portabilité des codes et leur migration vers de nouvelles architectures hybrides qui se profilent à l'horizon 2025-2028 (CPU avec accélérateurs graphiques ou, ultérieurement, vers des plateformes expérimentales de type Field Programmable Gate Arrays). Des gains notables de consommation énergétique peuvent être attendus sur ce terrain. De tels sauts technologiques imposent une lourde procédure de réécriture des codes de simulation.

L'équipe de recherche en PNT de Météo-France consacre entre 1 et 2 ETP à l'optimisation continue des codes opérationnels. Concernant l'adaptation à de nouvelles architectures, Météo-France engage pour ce projet de renouvellement de l'ordre de 17 personnes.an sur 4 ans (de 2021 à 2024 inclus). Cet effort d'adaptation peut atteindre 35 personnes.an, grâce à la participation du

---

<sup>3</sup> Ainsi, selon Météo-France, une étude de 2016 indique que pour 1 euro investi dans le supercalculateur à Météo-France, le bénéfice pour la société est au moins de 12 euros.

consortium ACORD, éventuellement complété de moyens associés à des financements extérieurs (par exemple l'initiative « Destination Earth » de la Commission Européenne).

### **Les ressources de calcul de Météo-France ont un impact direct sur la qualité de la PNT**

La capacité de calcul intensif de Météo-France est répartie sur deux machines localisées sur deux sites distincts, pour assurer la continuité de ses services. Un supercalculateur est dédié aux activités opérationnelles tandis que le second est en principe utilisé pour les besoins de la recherche. Cette organisation permet d'assurer la résilience et la continuité des services de l'établissement puisqu'en cas de dysfonctionnement sur le supercalculateur opérationnel, le second, consacré à la recherche, est susceptible de prendre le relai sans délai.

Environ 60 % des moyens de calcul de Météo-France sont exploités au service des modèles de PNT, tant pour des tâches opérationnelles que de recherche. La recherche sur le climat consomme près d'un tiers des capacités de calcul, les 10 % résiduels sont utilisés par des partenaires. Le coût total du projet atteint **144 M€** sur la période 2019-2025. Il inclut le paiement de la redevance pour les supercalculateurs, le coût de leur consommation électrique, ainsi que les dépenses connexes nécessaires au fonctionnement et à l'exploitation des données produites.<sup>4</sup>

Les progrès de la PNT (degré de fiabilité accru, hausse des échéances de prévision, hausse de précision dans la localisation, amélioration de la capacité de détection des phénomènes extrêmes) et la qualité et la fiabilité de celle-ci sont directement liés aux capacités de calcul intensif.

### **Mais la PNT tire aussi partie d'un réseau technologique et de partenaires**

Météo-France dispose d'une part de son propre réseau de moyens d'observation de l'état de l'atmosphère et, d'autre part, collecte et assimile des volumes de données provenant de sources externes, via ses partenaires. Les capacités de calcul et d'analyse de données sont déterminantes pour l'établissement, puisqu'elles conditionnent les performances et la granularité et la résolution des modèles de prévision numérique du temps. Depuis quelques années, Météo-France dispose d'un atout supplémentaire dans l'analyse de larges volumes de données, avec l'introduction d'algorithmes issus de l'intelligence artificielle. Une puissance de calcul accrue signifie la possibilité de mettre en œuvre des modèles de PNT basés sur le concept de prévision d'ensemble.

Les options de mutualisation des supercalculateurs avec d'autres opérateurs ou organismes français ou européens ont été évaluées et considérées comme n'étant pas viables, sauf de manière marginale. Les codes de simulation, en revanche, sont co-développés avec le CEPMMT et les équipes de prévision numérique de plus d'une vingtaine de services météorologiques nationaux regroupés dans le consortium ACCORD. Plusieurs avantages en découlent : une réduction de la taille des équipes de développeurs, une portabilité accrue des développements, une cohérence qui facilite les évolutions logicielles. Par comparaison, le Met Office britannique qui a développé seul son système de PNT l'a fait avec des effectifs au moins deux fois plus importants que ceux de Météo France.

### **L'adaptation des modèles à la nouvelle architecture comporte des risques non évalués**

Dans l'hypothèse, vraisemblable, où une architecture hybride est retenue, le planning de développement vise à disposer d'une première prévision d'AROME ou d'ARPEGE s'exécutant sur GPGPU d'ici mi-2023 pour la première mise à disposition des codes vers les constructeurs, et de porter l'ensemble des configurations de prévision d'ici 2025. Le risque principal concerne un éventuel retard de l'adaptation des codes qui conduirait à devoir lancer la procédure d'appel

---

<sup>4</sup> Rapport d'information n° 840 (2020-2021) de M. Vincent CAPO-CANELLAS, fait au nom de la commission des finances du Sénat, déposé le 22 septembre 2021.

d'offres en l'accompagnant d'un « jeu d'étalonnage » sous-optimal au regard de l'architecture. L'impact de ce retard sur les coûts du marché de renouvellement lui-même est estimé quasi nul; le budget étant communiqué aux constructeurs lors de la procédure d'appel d'offres.

### **Les critères de renouvellement doivent tenir compte des défis énergétiques et environnementaux**

Les écarts de performances énergétiques entre les différentes architectures peuvent avoir un impact conséquent sur la consommation électrique, donc sur le budget total de l'opération et sur le bilan carbone. L'impact écologique est en effet un critère de choix à travers des exigences sur la consommation électrique et les moyens de refroidissement, dont au moins 90 % se feront via de l'eau tiède. Lors du précédent marché de renouvellement, un critère d'efficacité énergétique, estimation des Flop/Watt, représentait 10 % de la notation des candidats (20% sur le prix et les 70% restant sur les performances & le support proposé).

Il n'existe pas d'estimation du coût énergétique associé aux simulations unitaires de PNT qui seront réalisées dans le cadre de Calcul 2025. Seule la consommation électrique globale nécessaire pour opérer les futures machines (nœuds et refroidissement) est estimée. Le budget de consommation électrique estimé pour les 5 années de durée de vie des machines est de 54M€. Cela couvre l'ensemble des consommations électriques des data-centers : les supercalculateurs, les serveurs de pré/post-traitement, le stockage et les équipements d'alimentation électrique et de refroidissement.

### **Une stratégie de renouvellement à coût énergétique constant pourrait constituer une alternative intéressante à l'étude des caractéristiques du futur supercalculateur.**

### **D'autres facteurs de risques mériteraient une évaluation plus détaillée**

Les experts estiment que les chiffrages des différentes options ou variantes présentées sont plausibles, quoique difficiles à vérifier, faute d'une description technique précise des architectures concernées. Les risques de dépassement des coûts sont négligeables. En effet, le processus de sélection du supercalculateur, sous forme d'appel d'offre avec prix limite, prémunit contre le risque de dépassement du coût. Les risques qui pourraient intervenir dans la qualité des prestations fournies par les constructeurs sont minimes. Météo-France a analysé avec soin, par retour d'expérience, les précautions à prendre pour que ces risques soient les plus réduits possibles. Il existe néanmoins des facteurs de risques non négligeables qui n'ont pas été identifiés dans le document. Ce sont ceux concernant notamment les coûts d'exploitation (augmentation du prix de l'électricité), ainsi que le surcoût éventuel lié à l'augmentation du prix des processeurs de calcul, ou encore les risques liés à des retards de livraisons des supercalculateurs (pénurie de composants).

## 5.2 Les gains socio-économiques ne dépendent pas de façon continue de la performance de calcul

L'hypothèse commune faite dans le rapport d'évaluation est que chaque option produira dans chaque secteur un effet significatif et proportionnel à l'augmentation de la capacité de calcul. On donne dans la section 4.12 une synthèse de ces hypothèses d'amélioration des prévisions et de leur gain économique associé.

Les hypothèses explicites à dire d'experts d'amélioration des performances de prévision présentent le mérite de la lisibilité. Toutefois, comme il nous l'a été rappelé au cours des entretiens avec la direction de Météo France, la relation entre l'amélioration des prévisions

mesurées par des scores précis et l'augmentation des performances de calcul est une relation qui présente des sauts. Il est nécessaire de franchir certains seuils technologiques pour constater un effet significatif sur l'amélioration des scores de prévision (cf Figure 2, section 2.3).

Par ailleurs, cet effet de seuil se constate également dans les secteurs de l'économie. La même amélioration d'un délai de prévenance qui peut avoir un impact positif sur un secteur donné (l'agriculture) n'en aura pas pour un autre (la gestion des autoroutes) parce qu'il reste encore trop court pour voir un effet sur les décisions opérationnelles.

Aussi, il nous semble que l'étude sous-estime les questions de significativité de l'amélioration des performances des prévisions et des gains économiques associés imputables à la seule augmentation des performances des supercalculateurs.

L'importance de la significativité des progrès de la prévision pour le décideur peut s'illustrer dans l'exemple caricatural suivant. Supposons que les options x3, x6 et x12 ont respectivement 1 chance sur 5, 1 sur 4 et 1 chance sur 2 de conduire à une amélioration significative des scores de prévision imputable à l'augmentation de la capacité de calcul et que les gains socio-économiques estimés ne sont engrangés que si cette amélioration a lieu. Alors les VAN dans les trois scénarios ne sont plus respectivement 673 M€, 1 120 M€ et 1 277 M€, mais 43 M€, 56 M€ et 310 M€.

Pour cette raison, il nous paraît important que des études ex post portant sur les relations entre les augmentations de capacité de calcul et leurs effets sur les différents types de prévision quantifient l'incertitude liée à ces renouvellements de machines. Ces études permettraient de donner un support quantifié aux dires d'experts sur les améliorations probables de la PNT dans toutes ses dimensions (températures, pressions, vitesses des vents...).

En particulier, les effets sur les scores de prévision du dernier renouvellement des supercalculateurs de Météo France instruit en 2016 et livrés à mi-2021 seraient un élément important permettant au décideur de mesurer l'effet sur la prévision d'une multiplication par 5 de ses capacités de calcul.

### 5.3 La stratégie de Météo France est orientée par les besoins des usagers institutionnels et non par la valeur économique vis-à-vis des tiers extérieurs

Météo France est un établissement public dont les missions ont été rappelées dans la section 2 de ce document. La sécurité des personnes et des biens, l'appui aux services de Défense et de l'Aviation civile font partie des axes majeurs de sa raison d'être. Toutefois, Météo France développe également une activité commerciale concurrentielle. L'établissement commercialise des services aux entreprises et institutions climato-sensibles à partir des sorties des modèles de prévision.

Dans ce contexte, il paraît légitime de s'interroger sur la place des besoins et des attentes exprimées des grands clients de l'établissement dans l'évolution de ses modèles de prévision et plus largement dans l'ensemble de ses choix stratégiques en matière de PNT.

Toutefois, comme il nous l'a été rappelé au cours d'un entretien avec la Direction de la Stratégie et de la Direction Commerciale, les choix d'architectures et les développements des modèles de prévisions sont guidés par les attentes de ses usagers institutionnels pour la réalisation de ses missions régaliennes. Les développements de modèles et les renouvellements des supercalculateurs sont conçus pour remplir ces missions. Les prévisions qui en résultent sont alors valorisées auprès des clients de l'établissement.

De ce fait, il ressort du cadre institutionnel dans lequel opère Météo France que les renouvellements de leurs supercalculateurs sont construits selon le schéma simplificateur

suivant : Budget -> Caractéristiques Techniques des machines -> Raffinement des modèles -> Gains probables en prévisions -> gains socio-économiques.

Ce chaînage explique un certain déficit constaté de la valeur créée par les prévisions auprès des clients de l'établissement. Ce déficit se traduit également dans la tarification des services de prévision qui se fait au coût et non pas selon la valeur. Un autre chaînage aurait été possible partant de la valeur potentielle créée et remontant jusqu'au budget nécessaire de renouvellement des machines : Gains socio-économiques possibles par secteur selon l'amélioration de la prévision -> Modèles requis pour atteindre ces qualités de prévision -> Capacité de calcul requise pour exécuter ces modèles dans un temps contraint -> Budget nécessaire.

La mise en œuvre de ce schéma permettrait d'identifier les secteurs de l'économie les plus propices à de la création de valeur par des prévisions adaptées et d'en déduire les évolutions requises des modèles, et les besoins en capacité de calcul. Elle permettrait également d'éclairer la stratégie de l'établissement en matière de développement commercial dans un secteur présentant un fort potentiel de croissance.

Par ailleurs, ce processus entre dans le cadre de la stratégie scientifique 2020-2030 de Météo France dont l'un des axes porte sur la Valorisation des prévisions météorologiques et climatiques en réponse aux attentes des bénéficiaires internes et externes. Les effets de la mise en œuvre de cet axe stratégique devraient se matérialiser dans la prochaine instruction de renouvellement de ses supercalculateurs.

## 6 Conclusions et recommandations

Le dossier d'évaluation socio-économique de renouvellement des supercalculateurs de Météo France pour 2025 met en œuvre les recommandations sur l'évaluation économique des investissements publics. Il développe des méthodes systématiques et fournit des estimations des gains économiques induits par l'augmentation de la capacité de calcul de l'établissement dans une dizaine de secteurs de l'économie. À ce titre, il répond au cadre réglementaire portant sur l'évaluation des investissements publics en mettant en place une démarche exemplaire.

Par ailleurs, les arguments d'obsolescence ne laissent pas de doute sur le besoin de renouvellement des supercalculateurs de Météo France.

De plus, en dépit des incertitudes dans les quantifications économiques, les estimations opérées reposent sur des hypothèses explicitées et justifiées qui donnent un faisceau convergent d'arguments montrant l'existence d'un bénéfice socio-économique à l'opération et ceci, quel que soit le scénario proposé. Le tableau ci-dessous résume les coûts estimés des différentes options ainsi que les gains par secteur et les différents totaux :

	x3	x6	x12
Coût d'investissement	<b>115</b>	<b>298</b>	<b>657</b>
Gains socio-économiques	<b>788</b>	<b>1 417</b>	<b>1 935</b>
VAN	<b>673</b>	<b>1 120</b>	<b>1 277</b>

Pour chaque secteur, les hypothèses font preuve d'une prudence qui permet de penser que les estimations minorent les gains potentiels réels. Les estimations obtenues pour le secteur de l'énergie sont à ce titre emblématiques. D'une part, l'approche utilisée pour valoriser la prévision météorologique ne nous paraît pas la plus adaptée. En effet, la prévision saisonnière nous semble moins porteuse de valeur que l'amélioration de la prévision à court terme. D'autre part, le secteur de l'énergie représente entre 2 et 5% de la valeur totale créée par la prévision numérique du temps alors qu'elle représente 11% du chiffre d'affaires de l'activité commerciale de l'établissement. À l'inverse les estimations concernant les projections climatiques nous semblent plus fragiles.

En ce qui concerne les différentes options, leur différenciation nous paraît plus difficile à évaluer. En effet, la méthodologie employée repose sur une hypothèse de progression continue des gains en fonction de la capacité de calcul. Cependant, les entretiens avec l'établissement nous ont montré qu'une augmentation de la puissance de calcul ne conduit pas nécessairement à une amélioration significative des prévisions. Il est nécessaire de franchir un certain seuil de résolution, et donc de puissance de calcul, pour obtenir l'effet recherché. Comme l'amélioration de la prévision est une condition nécessaire de la matérialisation des gains socio-économiques, l'hypothèse de gains proportionnelle aux puissances nous paraît discutable.

Ainsi, au vu des caractéristiques techniques des modèles et des améliorations espérées dans les prévisions, l'option x3 nous paraît peu susceptible de permettre le franchissement de seuil espéré dans les scores de prévision.

En revanche, l'option x6 paraît déjà offrir un niveau de garantie suffisant et constituerait un scénario préféré. Toutefois, il nous semble utile que le décideur public dispose des résultats du dernier renouvellement des supercalculateurs survenus mi-2021 pour apprécier l'effet d'une multiplication par 5 de la capacité de calcul de Météo France. Enfin, des compléments d'information sont requis pour justifier le choix de l'option x12, en particulier sur ses chances relatives de produire l'effet recherché par rapport à l'option x6.

Par ailleurs, dans une perspective à plus long terme d'évaluation des gains socio-économiques des renouvellements de leurs supercalculateurs, nous formulons les recommandations suivantes.

1. Actuellement, les options d'investissement sont établies sur le seul facteur de la puissance de calcul. Nous recommandons que l'établissement étudie la possibilité de construire ses scénarios sur des facteurs qui séparent clairement ce qui ressort de la machine et ce qui ressort de l'amélioration des codes ou de l'infrastructure d'acquisition et de traitement des données. Par ailleurs, il devrait étudier les critères fondés sur la consommation énergétique et l'impact environnemental.

2. Le lien entre les performances de calcul et les améliorations des scores de prévision étant une composante fondamentale de la chaîne de création de valeur des prévisions, nous recommandons que les dossiers fassent état d'études ex post permettant de quantifier cette relation. Les incertitudes constituent également un élément essentiel de la décision.

3. La mise en œuvre de la stratégie scientifique de Météo France portant sur la valorisation des prévisions météorologiques doit conduire l'établissement à développer et internaliser une connaissance détaillée des valeurs des différentes prévisions pour les entreprises et les institutions. La construction des scénarios de renouvellement devrait bénéficier de ces évaluations en amont du dimensionnement des solutions de supercalculateurs. En particulier, les secteurs de l'énergie, du transport terrestre et de l'agriculture devraient bénéficier d'analyses plus détaillées des effets de la prévision numérique du temps.

4. L'activité commerciale de l'établissement a un double rôle à jouer dans les projets de renouvellement des supercalculateurs. D'une part, elle constitue un vecteur privilégié d'information sur la valeur de la prévision numérique du temps pour les grands clients de l'établissement. À ce titre, elle contribue au point précédent sur l'identification de la valeur de la prévision dans les différents secteurs de l'économie. D'autre part, le secteur des prévisions météorologiques présente une croissance potentielle au-delà des hypothèses actuelles retenues par l'établissement. Dans ce contexte, l'activité commerciale peut contribuer de façon plus significative qu'à l'heure actuelle à l'équilibre budgétaire des projets de renouvellement des machines de calcul.

5. Les gains induits par le renouvellement des supercalculateurs de Météo France sont issus d'une part de l'amélioration de la prévision numérique du temps et d'autre part des projections climatiques. Ces deux champs de création de valeur nous semblent ressortir de méthodes d'analyse économique différentes. À ce titre, il semblerait pertinent que l'établissement sépare les deux champs dans ces futures évaluations socio-économiques et qu'il consacre une étude spécifique à la place des projections climatiques dans l'économie française.

## 7 Références bibliographiques

[1] « Évaluation socioéconomique du renouvellement des supercalculateurs de Météo-France en 2025 », CITIZING pour Météo-France, septembre 2021.

[2] France Stratégie & Direction générale du Trésor. Guide de l'évaluation socio-économique des investissements publics, décembre 2017.

[3] Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective. L'évaluation socio-économique des investissements publics, rapport du groupe de travail présidé par Emile Quinet, septembre 2013.

[4] Rapport d'information n° 840 (2020-2021) de M. Vincent CAPO-CANELLAS, fait au nom de la commission des finances du Sénat, déposé le 22 septembre 2021.