

Date
Janvier 2021

VILLE DE PARIS

ACTUALISATION DU
DIAGNOSTIC DE VULNERABILITÉ
DE PARIS AUX CHANGEMENTS
CLIMATIQUES ET A LA
RAREFACTION DES RESSOURCES

CAHIER 2 : LES ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES À PARIS



Rédacteurs	Nils Hempelmann, Adeline Cauchy (Ramboll)
Contributeur	Christian Pagé (Cerfacs), Yoelma Rodriguez-Dartois
Approbateur	Ghislain Dubois (Ramboll)
Coordination	Julie Roussel
Ville de Paris	Yann Françoise

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. METHODOLOGIE D'ACTUALISATION DES ALÉAS CLIMATIQUES	2
1.1 Typologie des aléas climatiques étudiés	2
1.2 Processus d'actualisation	3
1.3 Données produites et données existantes	3
1.4 Données utilisées par aléa	4
2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR LES PROJECTIONS CLIMATIQUES	5
2.1 La base de données CMIP6	5
2.2 Sélection des modèles et trajectoires socioéconomiques pour Paris	8
2.3 Ajustement des biais des modèles	11
2.4 Indicateurs climatiques produits	12
2.5 Choix des horizons temporels	13
2.6 Visualisation et interprétation des résultats	13
2.7 Limites de l'exercice et précautions d'emploi	15
3. EVOLUTIONS DES ALEAS LIES AUX TEMPERATURES	16
3.1 Un îlot de chaleur urbaine amplifiant les enjeux de température	16
3.2 Températures moyennes : un réchauffement qui se poursuit et s'accélère	17
3.3 Fortes chaleurs, un enjeu de plus en plus critique	20
3.4 Une diminution des grands froids	25
3.5 Une baisse des enjeux liés à la neige et au verglas	29
4. EVOLUTION DES ALEAS LIES AUX PRECIPITATIONS	33
4.1 Une modification du régime de précipitations	33
4.2 La question des fortes pluies et des inondations	34
4.3 Des sécheresses des sols plus nombreuses	38
5. EVOLUTION DE L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN	40
5.1 Cavités souterraines (calcaire et gypse)	40
5.2 Retrait-gonflement des argiles – Sécheresse géotechnique	40
6. EVOLUTION DES TEMPETES	42
SYNTHESE ET NOTATION DES ALÉAS POUR L'INDICE 2020	43
Une vision synthétique des évolutions passées et à venir	43
Notation de la composante « aléa » de l'indice 2020	45
BIBLIOGRAPHIE ET DONNÉES	52

ANNEXES

Annexe 1

Tableau de bord des indicateurs climatiques

Annexe 2

Grille de notation des aléas

INTRODUCTION

Précisant son Plan Climat de 2007 alors principalement consacré au volet atténuation, la Ville de Paris s'est dotée en 2012 d'une première étude de vulnérabilités et de robustesses face au changement climatique et à la raréfaction des ressources. Ce diagnostic a permis de dresser un inventaire exhaustif des vulnérabilités socio-économiques et environnementales à l'œuvre sur son territoire.

Paris y apparaît comme une ville robuste à bien des égards : solidité de ses infrastructures, existence de plans de gestion et de prévention des risques, ouvrages de protection notamment. Mais elle présente aussi des fragilités : amplification des canicules et de l'îlot de chaleur urbain, sécheresses de plus en plus sévères, incertitude sur la survenue d'une crue centennale. Ces modifications à l'œuvre affectent déjà les ressources du territoire (eau, biodiversité, énergie), les populations (santé, précarité), les infrastructures (réseaux, bâti) et activités économiques et administratives, fortement concentrées sur la capitale.

Forte de cette étude, la Ville a engagé un travail de co-construction et d'implication de ses services dans une démarche d'adaptation conduisant à l'adoption, en septembre 2015, d'une stratégie globale d'adaptation au changement climatique.

La Ville de Paris souhaite aujourd'hui conforter la place de l'adaptation au sein de sa politique climatique. En cohérence avec ses obligations réglementaires, elle requiert l'actualisation de ses outils de pilotage permettant d'apprécier et d'anticiper l'évolution des risques climatiques et de raréfaction de ses ressources.

Cette actualisation s'organise en plusieurs étapes :

- La mise à jour de l'approche d'analyse des risques pour Paris et de l'outil qui en découle (Cahier 1) ;
- **La mise à jour de la composante « aléas » de cette approche, notamment par le développement de projections climatiques dernière génération utilisant la base de données servant le prochain rapport du GIEC (AR6) (Présent cahier) ;**
- La mise à jour de la composante « ressources » avec l'inclusion notamment de nouvelles dimensions prospectives et thématiques (qualité de l'air par exemple) (Cahier 3) ;
- L'actualisation de la notation des systèmes et une vision transversale des priorités (Cahier4) ;
- L'approfondissement de la connaissance autour de certains systèmes :
 - Assurances (Cahier 5)
 - Migrations climatiques (Cahier 6)
 - Grands événements (Cahier 7)
- Un répertoire des données géolocalisées, collectées pour la préparation future d'un atlas cartographique de la vulnérabilité du territoire parisien.

Ce cahier présente la méthodologie d'actualisation des aléas climatiques ainsi que l'approche de développement spécifique des projections climatiques. Les résultats de l'actualisation sont présentés par aléa, sous les prismes du climat passé et du climat futur. La notation de la composante « aléas » de l'indice 2020 est ensuite détaillée.

1. METHODOLOGIE D'ACTUALISATION DES ALÉAS CLIMATIQUES

Cette partie détaille la méthodologie employée pour la mise à jour des données et de la notation de la composante « aléas » de l'indice de risque 2020.

1.1 Typologie des aléas climatiques étudiés

L'**aléa climatique**, indique la probabilité d'occurrence d'un phénomène direct (ex : fortes pluies) ou d'un impact physique (ex : inondation). Outre leur occurrence, les dangers se caractérisent par leur intensité, leur localisation spatiale, la durée de l'impact et leur degré de soudaineté¹.

Plus précisément, le diagnostic repose ici sur la mise à jour d'un set d'aléas climatiques **tendanciels** (ex : précipitation moyenne), **sévères** (ex : canicule) ainsi que des **aléas physiques** (ex : inondation) permettant d'apprécier les changements climatiques en cours et à venir sur le territoire parisien. Les aléas retenus sont identiques à ceux de l'étude de 2012.

Figure 1 : Les aléas climatiques et ressources étudiés



Il nous semble important de préciser les modalités de prise en compte de la sécheresse sous les différents aléas et ressources, pour éviter la double voire triple comptabilité du phénomène².

Plusieurs formes de sécheresse sont étudiées :

- **La sécheresse des sols** (aussi appelé sécheresse édaphique ou agricole) : le déficit de précipitation sur une période plus ou moins longue (sécheresse météorologique) se répercute sur les sols et altère le développement de la végétation (les racines ne sont plus capables d'extraire l'eau du sol) ;
- **La sécheresse hydrologique** : le déficit pluviométrique peut se répercuter sur le niveau d'eau des milieux (eaux souterraines et superficielles) et conduire à des sécheresses dites hydrologiques (étiage sévère voire assec dans certains cas). **Dans la présente étude, ce phénomène est étudié dans le volet raréfaction de la « ressource en eau » disponible dans le cahier 3 ;**

¹ ADEME, 2012 : Diagnostic de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique. Eléments méthodologiques tirés de l'expérience internationale.

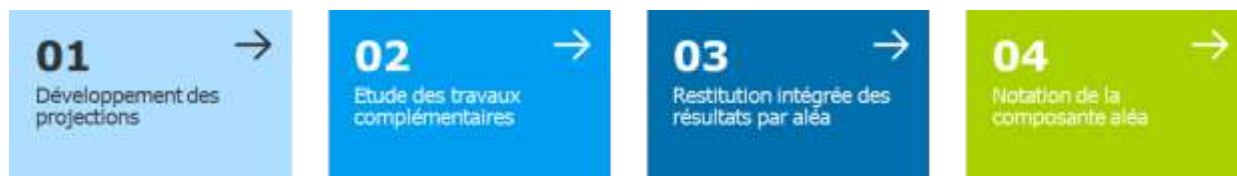
² Dans l'exercice de 2012, l'aléa sécheresse ne se limitait pas au sol. La sécheresse hydrologique était souvent comptabilisée deux fois, sous l'aléa sécheresse mais aussi dans l'étude de la raréfaction de la « ressource en eau ».

- **La sécheresse géotechnique** : il s'agit de la déformation des sols argileux par manque d'eau, qui entraîne la fragilisation et la fissuration des bâtiments à faibles fondations. Cet aléa est étudié sous le volet « mouvement de terrain ».

1.2 Processus d'actualisation

Le processus d'actualisation de la composante « aléas climatiques » est résumé dans le figure suivante :

Figure 2 : Processus d'actualisation des aléas climatiques



La notation finale des aléas est alors reportée dans les matrices d'indice de risques des systèmes.

1.3 Données produites et données existantes

Il a été retenu de présenter à la fois, une vision historique des aléas, correspondant donc aux évolutions passées depuis le début des observations disponibles jusqu'à une période récente mais aussi une vision projetée des futurs possibles.

Deux types de données sont mobilisés pour l'exercice :

- Les données produites à savoir les observations et projections climatiques pour un set resserré d'indicateurs (15) ;
- Les données, cartographies et travaux existants venant compléter l'analyse.

En ce qui concerne les données produites, elles utilisent deux sources de données principales :

- Les données d'observations pour la Station Paris-Montsouris mises à disposition par Météo-France ;
- La base de données CMIP6, détaillée dans la section inhérente aux projections climatiques.

Des données et travaux complémentaires, de nature transversale, ont été mobilisés pour préciser certains aléas et leurs caractéristiques ou pour affiner la lecture des résultats sur des pas de temps non couverts par les projections. En particulier :

- Le site Climat^{HD} de Météo-France, qui propose une analyse historique et future du climat régional avec un set de visualisations avancé ;
- L'étude de 2015 du climat parisien menée par l'Agence Parisienne du Climat (APC) conjointement avec Météo-France ;
- Des travaux sur les événements extrêmes menés récemment en France : projet Extremoscope de l'Institut Pierre Simon Laplace (Vautard et al., 2016), travaux de l'Observation National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC, 2018).

Enfin, des données spécifiques à certains aléas ont été mobilisées :

- Cartographie des aléas (inondation, îlot de chaleur, mouvement de terrain, etc.) ;
- Série historique des aléas physiques type inondation ;
- Travaux de recherche spécifiques à certains aléas (ex : inondation).

1.4 Données utilisées par aléa

Nous présentons ici par aléa, les données produites ainsi que les travaux ou données existants mobilisés pour affiner leur appréciation.

	Données produites (séries historiques station Montsouris et projections CMIP6)	Travaux et données complémentaires mobilisées
Température moyenne	• Température moyenne quotidienne (°C) • Température maximale quotidienne (°C)	• Modélisation passée de l'îlot de chaleur urbain (Copernicus Climate Change Service – C3S) • Projections climatiques pour Paris développées par APC/Météo-France (2015)
Pluviométrie moyenne	• Cumul pluviométrique annuel (mm/an) • Nombre de jours de pluie : cumul de précipitations ≥ 1 mm (j/an)	
Sécheresse des sols	• Nombre de jours sans précipitation (j/an) • Période de sécheresse (maximum de jours consécutifs avec cumul de précipitations < 1 mm)	Climat ^{HD} (Météo-France) observations et projections indice de sécheresse des sols
Canicule	• Nombre de jours chauds : ≥ 25 °C (j/an) • Nombre de jours très chauds : ≥ 30 °C (j/an) • Nombre de nuits tropicales : ≥ 20 °C (j/an) • Température maximale pour le jour le plus chaud sur les 30 ans (°C)	• Modélisation passée de l'îlot de chaleur urbain (Copernicus Climate Change Service – C3S) • Climat^{HD} (Météo-France) observations et projections indice de sécheresse des sols • Projections climatiques pour Paris développées par APC/Météo-France (2015)
Grand froid	• Température minimale quotidienne (°C) • Température minimale pour le jour le plus froid	• Climat^{HD} (Météo-France) vagues de froid • Projections climatiques pour Paris développées par APC/Météo-France (2015)
Neige et verglas	• Nombre de jours de gel : température minimale ≤ 0°C (j/an) • Nombre de jours sans dégel : température maximale ≤ 0°C (j/an)	
Fortes pluies		• Travaux sur événements extrêmes de l'ONERC, 2018. • Travaux CCR sur aléas (en partenariat avec Météo-France), 2018.
Inondations	• Cumul de précipitations maximales sur 5 jours consécutifs (mm/an) • Nombre maximum de jours de pluie consécutifs (maximum de jours consécutifs avec cumul de précipitations ≥ 1 mm)	• Dossier Départemental des risques majeurs (Préfecture de Police). • Plan de prévention du risque inondation (2007) • Travaux de Roudier et al., 2016. • Projet Extremoscope (ISPL, 2016) • Travaux CCR sur aléas (en partenariat avec Météo-France), 2018.
Tempêtes		• Site Tempêtes de Météo-France • Climat^{HD} (Météo-France) tempêtes
Mouvement de terrain		• Etude INERIS, 2010. • Cartographie de la Ville de Paris

2. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE POUR LES PROJECTIONS CLIMATIQUES

Cette partie se concentre exclusivement sur la méthodologie employée pour le développement des nouvelles données produites pour le projet à savoir les projections climatiques.

2.1 La base de données CMIP6

La Ville de Paris a opté pour une actualisation des projections climatiques à partir de la base de données du projet CMIP6³. Le projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP pour Coupled model intercomparison project en anglais) est un projet du programme mondial de recherche sur le climat (WCRP). Ce projet vise à réaliser des simulations climatiques de façons coordonnées entre les différents groupes de recherche, permettant une meilleure estimation et compréhension des différences entre les modèles climatiques. Les résultats des recherches basées sur ces simulations sont pris en compte dans l'évaluation de l'état des connaissances sur le climat par le groupe intergouvernemental d'expert sur le climat (GIEC). Les données CMIP6 serviront ainsi le 6^e rapport d'évaluation du GIEC ([à paraître en 2022](#)). Les données de cet exercice mondial sont accessibles via l'infrastructure [Earth System Grid Federation \(ESGF\)](#). **Dans le cadre du présent exercice, seuls les résultats des modèles français sont explorés (voir paragraphe 2.2.3).**

2.1.1 Une nouvelle génération de trajectoires socioéconomiques

Pour évaluer les évolutions futures du climat, les modèles climatiques émettent des réponses contrastées en fonction de l'ampleur des variations de plusieurs paramètres au premier rang desquels figurent les gaz à effet de serre (GES), dont le dioxyde de carbone. D'autres facteurs tels que les aérosols ou bien encore les modalités d'occupation des terres vont aussi influencer. En perturbant le bilan radiatif de la Terre, ils viennent ainsi induire des modifications du climat plus ou moins conséquentes en fonction de leur ampleur.

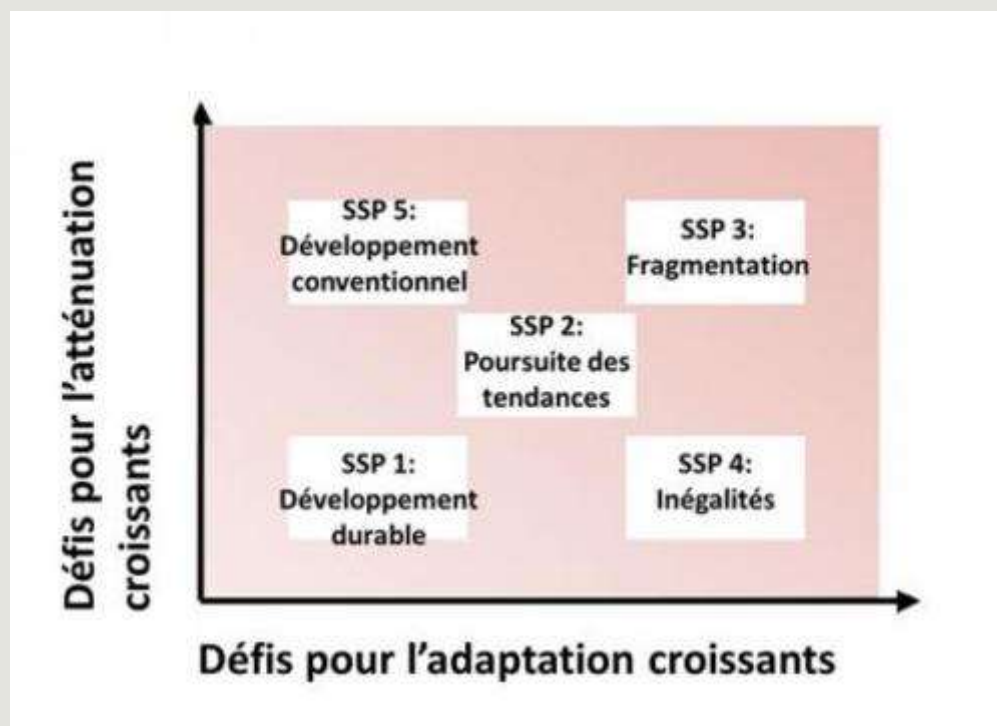
Des scénarios ou trajectoires socioéconomiques sont ainsi élaborées. On leur associe une concentration de GES. Ces scénarios sont élaborés en concertation avec plusieurs spécialités (économie du climat, experts sectoriels etc.). Ils constituent des visions plus ou moins durables du monde futur en fonction notamment des efforts d'atténuation et d'adaptation consentis par la communauté internationale.

Dans l'exercice CMIP6, ces trajectoires socioéconomiques portent le nom de SSP pour Shared Socio-economic Pathways en anglais.

Les nouveaux SSPs offrent cinq voies que le monde pourrait emprunter en fonction des politiques climatiques implémentées. Par rapport aux scénarios précédents, ceux-ci offrent aussi une vision plus large d'un monde sans politique climatique future, avec un réchauffement climatique en 2100 allant d'un minimum de 3,1°C à un maximum de 5,1°C au-dessus des niveaux préindustriels et ce à l'échelle du globe. Ils suggèrent, par exemple, qu'un avenir marqué par un "nationalisme renaissant" et une mauvaise organisation de l'ordre international pourrait rendre impossible l'atteinte de l'objectif de Paris visant à contenir le climat global bien en dessous des 2°C. Sont présentés ci-après les différents SSPs répartis selon les défis socioéconomiques pour l'atténuation et l'adaptation.

³ Dans l'exercice de 2012, l'aléa sécheresse ne se limitait pas au sol. La sécheresse hydrologique était souvent comptabilisée deux fois, sous l'aléa sécheresse mais aussi dans l'étude de la raréfaction de la « ressource en eau ».

Encadré 1 : Les cinq SSPs type, répartition selon les défis socio-économique pour l'adaptation et pour l'atténuation



Source : d'après A Nigell et al.

Le SSP1 (faible défi d'adaptation, faible défi d'atténuation), décrit un monde marqué par une forte coopération internationale, donnant la priorité au développement durable

Le SSP2 (défi d'adaptation moyen, défi d'atténuation moyen), décrit un monde caractérisé par la poursuite des tendances actuelles

Le SSP3 (défi d'adaptation élevé, défi d'atténuation élevé) dépeint un monde fragmenté affecté par la compétition entre pays, une croissance économique lente, des politiques orientées vers la sécurité et la production industrielle et peu soucieuses de l'environnement.

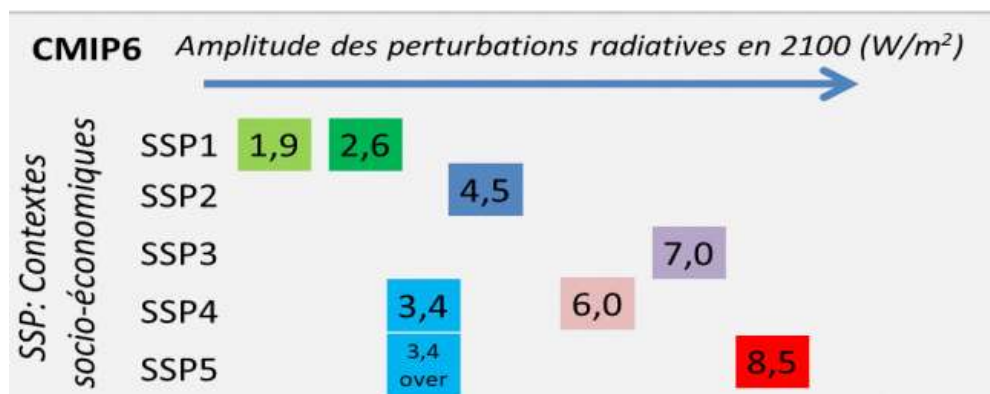
Le SSP4 (défi d'adaptation élevé, faible défi d'atténuation) est celui d'un monde marqué par de grandes inégalités entre pays et en leur sein. Une minorité y serait responsable de l'essentiel des émissions de GES, ce qui rend les politiques d'atténuation plus faciles à mettre en place tandis que la plus grande partie de la population resterait pauvre et vulnérable au changement climatique.

Le SSP5 (faible défi d'adaptation, défi d'atténuation élevé) décrit un monde qui se concentre sur un développement traditionnel et rapide des pays en voie de développement, fondé sur une forte consommation d'énergie et des technologies émettrices de carbone ; la hausse du niveau de vie permettrait d'augmenter la capacité d'adaptation, notamment grâce au recul de l'extrême pauvreté.

Source : Extrait de la synthèse DGEC/ONERC, 2013. Découvrir les nouveaux scénarios du GIEC.

On associe désormais à chacune des grandes trajectoires plusieurs histoires possibles correspondant in fine à des niveaux de forçage radiatif et de concentration de gaz à effet de serre. (Figure 3).

Figure 3 : Schéma des options choisies pour les scénarios de référence proposés dans CMIP6



Source : Conférence de presse, CNRS (17/09/19). Schéma adapté de O'Neill et coll. (GMD, 2018)

Le forçage radiatif mesure la différence entre l'énergie radiative reçue (chaleur produite via les rayons du soleil) et l'énergie sortant de l'atmosphère. Il se mesure en W/m². Les gaz à effet de serre ayant tendance à absorber cette énergie, plus ils seront importants plus l'énergie accumulée et le réchauffement seront importants.

A l'échelle globale, par exemple, pour la trajectoire SSP1, on dispose d'une trajectoire 1,9 (W/m²), **aussi appelée SSP1-1.9** plutôt orientée vers une politique ambitieuse visant à contenir l'augmentation mondiale des températures à 1,5°C. Sous le même SSP1 il existe aussi la trajectoire 2,6 (W/m²), **appelée SSP1-2.6** à laquelle est donc associée un niveau de forçage radiatif plus important et une augmentation des températures d'environ 2°C.

2.1.2 Des modèles climatiques toujours plus avancés

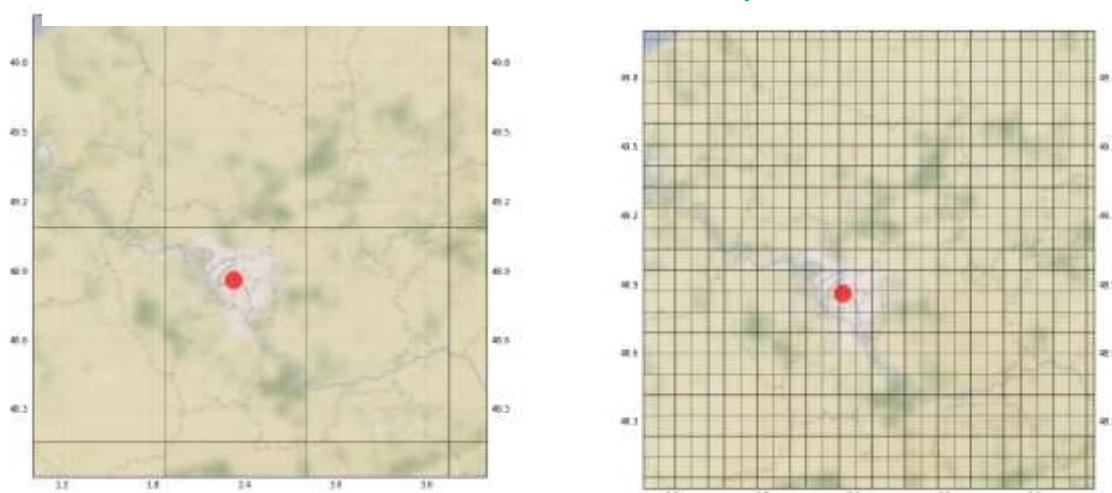
La France contribue de longue date aux efforts de modélisation de la communauté internationale. Cet effort est réalisé dans le cadre de l'infrastructure de recherche ClimeriFrance.

Ces quatre dernières années, l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et le Centre national de recherches météorologiques (CNRM : MétéoFrance/CNRS), en collaboration avec le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS), ont développé une nouvelle génération de modèles du climat. Ces nouveaux modèles, utilisés pour les simulations CMIP6, ouvrent pour la première fois de nouvelles possibilités d'analyse à l'échelle régionale mais aussi un nouveau cadre pour étudier les liens climat et environnement ainsi que les conséquences du changement climatique ([d'après Conférence de Presse, 2019](#)). Le nombre d'expériences par modèle a par ailleurs considérablement augmenté.

2.1.3 Des données partiellement mises à disposition

Les données françaises sont accessibles à travers le portail [ESGF](#) qui gère l'accessibilité aux données à l'échelle mondiale. Aujourd'hui (Septembre 2020), seules les données des modèles globaux (GCM) du nouvel exercice CMIP6 sont disponibles (maille de 50km). Contrairement aux données régionalisées disponibles pour le précédent exercice (CMIP5-EUROCORDERX maille de 11km), la maille couvrant Paris est donc beaucoup plus grossière (voir ci-dessous).

Figure 4 : Illustration de la résolution des données selon les deux exercices (CMIP6 à gauche – CMIP5-EUROCORDERX à droite)



IMPORTANT

Paris ne peut donc pas bénéficier à ce jour (Septembre 2020) des nouvelles données régionalisées dont la publication est attendue dans les prochains mois via l'exercice EURO-CORDEX à une maille encore plus fine (<11km).

2.2 Sélection des modèles et trajectoires socioéconomiques pour Paris

2.2.1 Les sources d'incertitude

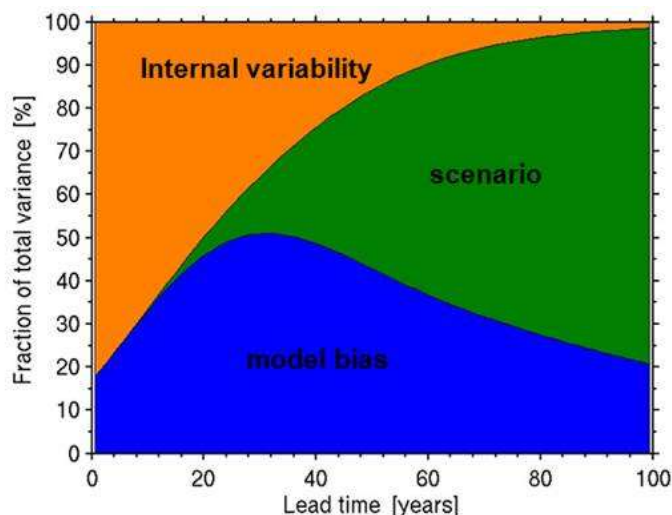
La mesure et la représentation de l'incertitude sont des questions clés dans la science du climat, et devraient l'être dans le processus de définition des politiques climatiques.

Les principales incertitudes (**Figure 5**) qui entourent le développement des projections climatiques sont :

- Les incertitudes sur le développement socio-économique, les futures émissions de gaz à effets de serre et aérosols ainsi que les futurs changements d'utilisation du sol (scénarios) ;
- Les incertitudes de facteurs externes comme l'activité solaire et les éruptions volcaniques ;
- Les incertitudes dues aux connaissances imparfaites du système climatique et sa modélisation, aux méthodes de descente d'échelle (biais des modèles) ;
- Les incertitudes dues au comportement chaotique (fortement non-linéaire) du système climatique (variabilité interne).

Si l'incertitude liée à la variabilité interne du climat domine dans les 20 premières années de simulation, celle liée aux modèles est prédominante après 30 années simulées, alors que l'incertitude liée aux scénarios socio-économiques devient prépondérante entre 60 et 100 années de simulation (en fin du 21^e siècle) et la variabilité interne, quasi inexistante.

Figure 5 : Les sources d'incertitudes des projections climatiques à différents horizons temporels



Source : Hawking E, Sutton R, 2009.

Ainsi, pour prendre en compte les incertitudes, il convient dans la mesure du possible de réaliser des projections climatiques à partir d'une expérience multimodèle et de plusieurs scénarios (encore appelés trajectoires).

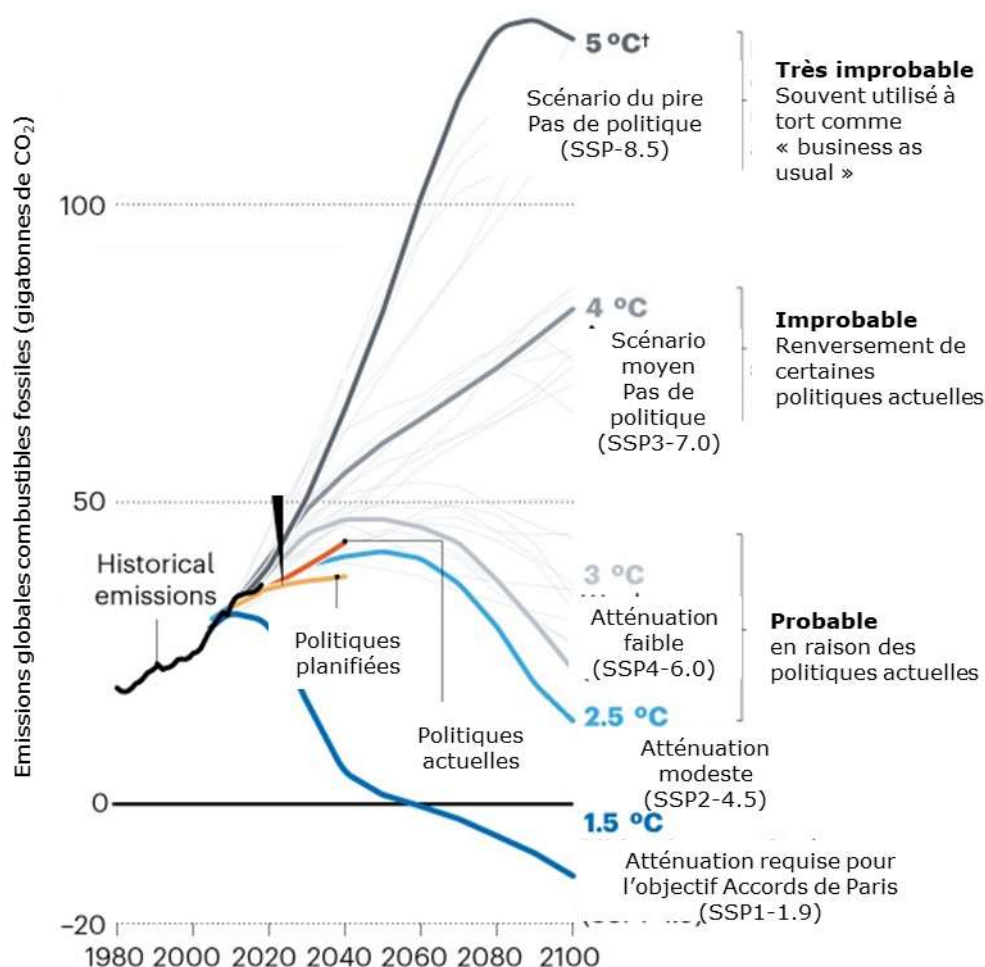
2.2.2 Trois trajectoires socioéconomiques retenues

Il a été décidé de retenir trois trajectoires à même d'illustrer le panel des futurs possibles et des incertitudes pour la ville de Paris :

- **Le SSP1- 2.6 (émissions mondiales de GES faibles)** correspond à un scénario volontariste en matière de développement durable et à une augmentation contenue de la température aux alentours de 2°C. A noter que le SSP1-1.9 reflétant une trajectoire vers 1,5°C n'était pas disponible pour un nombre d'expériences modèles suffisant.
- **Le SSP2-4.5 (émissions mondiales de GES moyennes)** correspond à un scénario intermédiaire caractérisé par la poursuite des tendances actuelles (défi d'adaptation et d'atténuation moyen).
- **Le SSP5-8.5 (fortes émissions mondiales de GES)**, scénario du « pire » repose sur un système fortement carboné avec absence de politique climatique.

Le graphique ci-dessous (**Figure 6**) propose une interprétation des différentes trajectoires possibles auxquelles sont associées des indications de probabilité. On peut y voir par ailleurs les émissions de GES historiques ainsi que les projections au vu des émissions actuelles et des engagements à l'échelle mondiale.

Figure 6 : Aperçu mondial des futurs possibles



Source graphique: Nature, Emissions – the 'business as usual' story is misleading, 29/01/2020, traduit de l'anglais.

2.2.3 Le choix des modèles français

Seuls les modèles français ont été retenus par la Ville de Paris dans le cadre de cette actualisation, à savoir ceux de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) et du Centre national de recherches météorologiques (CNRM : MétéoFrance/CNRS), en collaboration avec le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS)

- CNRM-CERFACS-CM6
- CNRM-CERFACS-ESM2
- IPSL-CM6A-LR

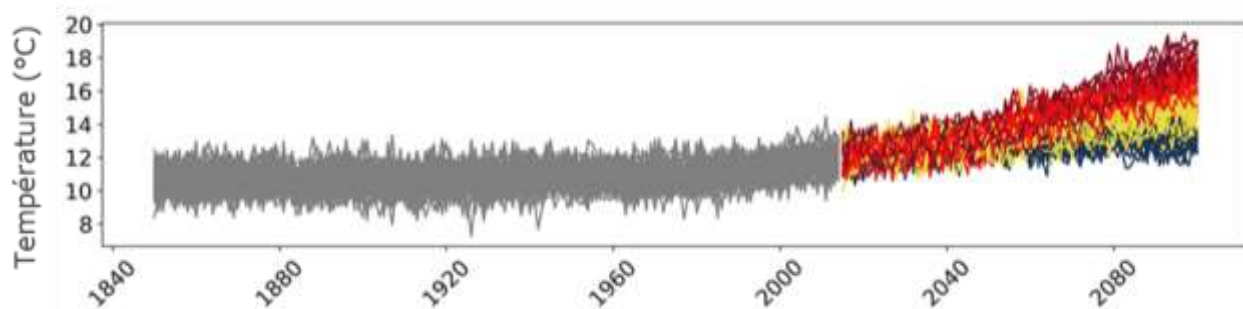
Chacun des modèles propose un nombre donné de simulations. Cela améliore la prise en compte des incertitudes inhérentes aux modèles. Sont présentés ci-après le nombre de simulations disponibles par variable climatique et trajectoire (Figure 7) ainsi qu'un exemple illustré pour la variable température moyenne (Figure 8). De ces variables essentielles découle l'ensemble des indicateurs de l'étude.

Figure 7 : Nombre de simulations disponibles par variable et trajectoire

Variable	Nombre de simulations de l'ensemble des modèles		
	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Températures moyennes à 2 mètres	18	22	17
Températures minimales à 2 mètres	10	13	10
Températures maximales à 2 mètres	10	13	10

Précipitations	12	13	12
----------------	----	----	----

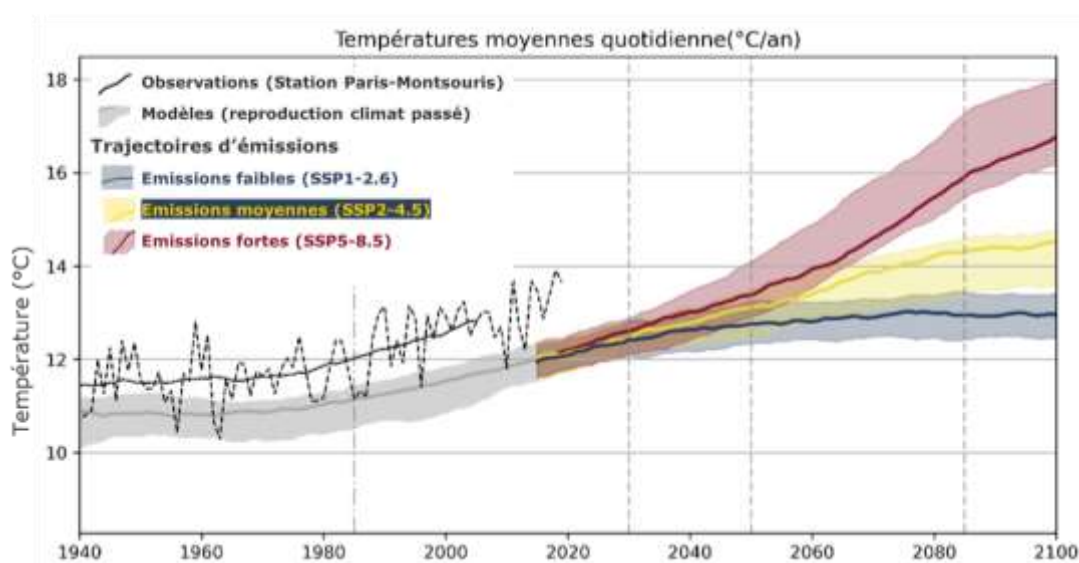
Figure 8 : Visualisation de l'ensemble des simulations disponibles pour la température moyenne annuelle (température en °C)



2.3 Ajustement des biais des modèles

Les modèles sont capables de simuler le climat futur mais présentent des biais systématiques lorsqu'ils sont comparés statistiquement aux observations climatologiques (**Figure 9**). La différence peut résulter de causes multiples : maille grossière des modèles globaux, mauvaise prise en compte de l'effet d'îlot de chaleur urbain dans leur paramétrage notamment.

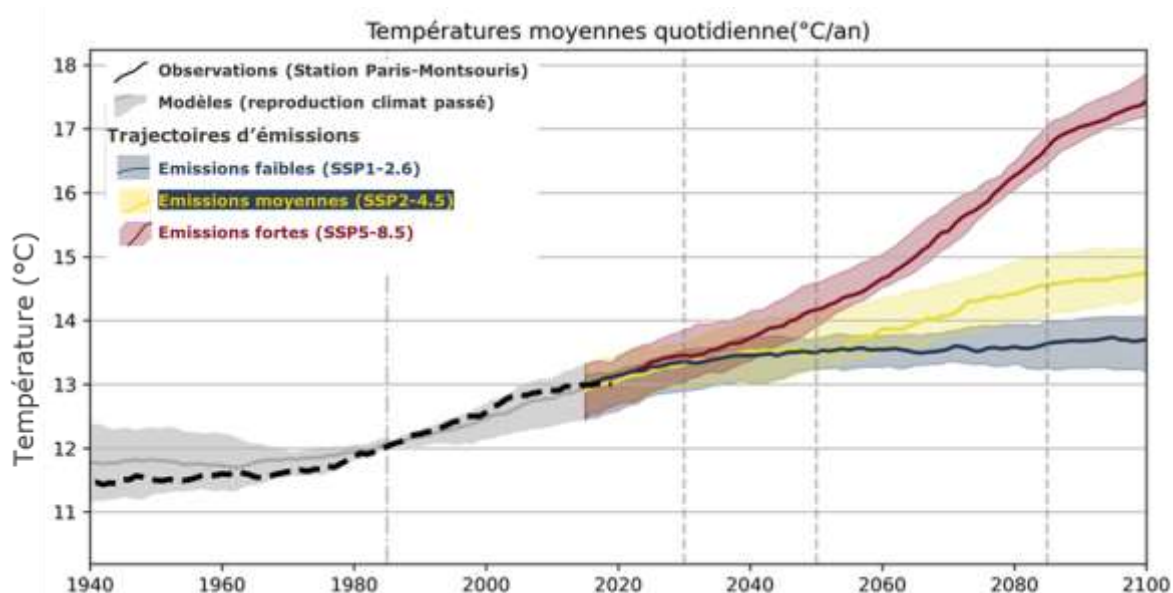
Figure 9 : Illustration des biais des modèles entre les simulations historiques brutes et les observations de la station Paris Montsouris.



Les méthodes d'ajustement des biais sont alors utilisées pour calibrer les simulations des modèles afin de s'assurer que leurs propriétés statistiques sont similaires à celles des valeurs correspondantes observées. Il existe dans la littérature plusieurs approches pour ajuster les résultats des modèles climatiques.

La méthode retenue dans le cadre de cet exercice est la méthode de correction quantile-quantile. Celle-ci consiste à élaborer une fonction de correction permettant de ramener la distribution statistique des modèles et des variables à celles des valeurs observées (**Figure 10**). Les valeurs observées sont celles de la station Paris-Montsouris.

Figure 10 : Illustration de la courbe des températures corrigée par la méthode quantile-quantile



2.4 Indicateurs climatiques produits

Dans la mesure du possible les indicateurs climatiques retenus dans le cadre de précédente étude sont également sélectionnés pour les besoins de la présente.

Figure 11 : les indicateurs climatiques modélisés

TEMPÉRATURES		Températures moyennes	- Température moyenne quotidienne (°C) - Température maximale quotidienne (°C)
		Canicules	- Nombre de jours chauds : $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (j/an) - Nombre de jours très chauds : $\geq 30^{\circ}\text{C}$ (j/an) - Nombre de nuits tropicales : $\geq 20^{\circ}\text{C}$ (j/an) - Température maximale pour le jour le plus chaud sur les 30 ans (°C)
		Grands froids	- Température minimale quotidienne (°C) - Température minimale pour le jour le plus froid
		Neige et verglas	- Nombre de jours de gel : température minimale $\leq 0^{\circ}\text{C}$ (j/an) - Nombre de jours sans dégel : température maximale $\leq 0^{\circ}\text{C}$ (j/an)
PLUVIOMÉTRIE		Précipitations moyennes	- Cumul pluviométrique annuel (mm/an) - Nombre de jours de pluie : cumul de précipitations ≥ 1 mm (j/an)
		Inondations	- Cumul de précipitations maximales sur 5 jours consécutifs (mm/an) - Nombre maximum de jours de pluie consécutifs (maximum de jours consécutifs avec cumul de précipitations ≥ 1 mm)

	 Sécheresses sols	Indicateurs de sécheresse météorologique (en premier lieu) • Nombre de jours sans précipitation (j/an) • Période de sécheresse (maximum de jours consécutifs avec cumul de précipitations < 1 mm)
--	--	---

2.5 Choix des horizons temporels

On retient plusieurs périodes et horizons temporels pour observer les évolutions passées et à venir. Ces horizons correspondent en général à une période de 30 ans, temps nécessaire pour construire une caractéristique climatique pour un indicateur donné.

2.5.1 Périodes d'observation passées

Les données d'observation de la station Paris-Montsouris, fournies par Météo-France pour les besoins de l'étude, sont incluses dans l'analyse pour retracer le climat depuis 1870. Nous disposons ainsi de trois périodes d'observation passée :

- **La période 1885** correspondant à la moyenne climatique 1871-1900 ;
- **La période 1985** aussi appelée « période de référence » pour la moyenne 1971-2000 ;
- **La période 2010** correspond au climat récent 2001-2019.

2.5.2 Horizons temporels futurs

Trois horizons temporels futurs ont été retenus :

- **L'horizon** de court terme **2030** (2015-2045) ;
- **L'horizon** de moyen terme **2050** (2035-2065) ;
- **L'horizon** de long terme **2085** (2071-2100).

2.6 Visualisation et interprétation des résultats

Pour chacun des indicateurs développés, une table des valeurs est présentée. Les valeurs indiquées représentent chacune la moyenne pour la période considérée et la médiane des expériences modèles et ce pour chacune des trajectoires. On donne ci-après un exemple de lecture (

Figure 12).

Figure 12 : Lecture d'une table d'indicateur

Température maximale du jour le plus chaud					
1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
33°C	33°C	36°C	35°C (34,7°C-35°C)	36°C (35,5°C-36,5°C)	37°C (35,6°C-41°C)
Observations (moyenne sur la période)			Projections (moyenne sur la période et médiane des expériences modélisées pour chacune des trajectoires)		
			(trajectoire « émissions faibles » -SSP1 2.6 ; Trajectoires « émissions fortes » - SSP5 8.5)		
			Trajectoire « émissions moyennes » (SSP2 4.5)		

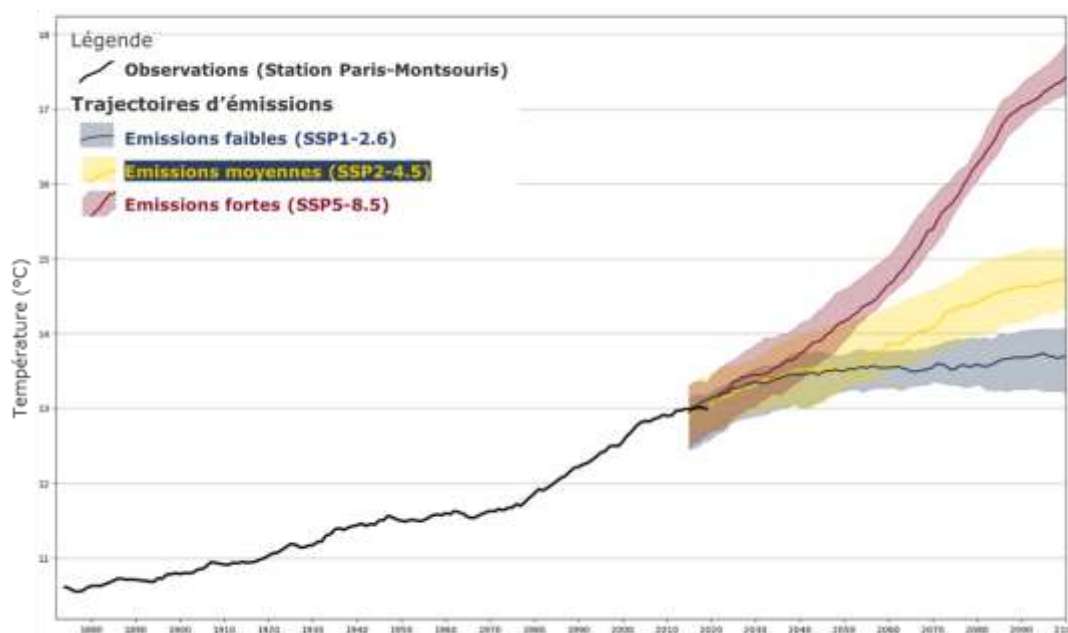
Source : Météo-France (données station Montsouris), CMIP6, modélisations françaises (projections climatiques), 2020

Lecture du tableau

En gris : la moyenne des observations à la station de Paris Montsouris sur 3 périodes passées : 1885 (1871-1900), 1985 (1971-2000), 2010 (2001-2019). En bleu, les résultats moyens des projections climatiques à trois horizons temporels à savoir 2030 (2015-2045), 2050 (2035-2065) et 2085 (2071-2100) et pour la médiane de chacune des 3 trajectoires : trajectoire « émissions moyennes » en gras (SSP2-4.5) encadrée entre parenthèses par celles aux « émissions faibles (SSP1-2.6) » puis « fortes (SSP5-8.5) ».

Pour certains indicateurs, nous présentons également des graphiques (Figure 13).

Figure 13 : exemple de représentation graphique et aide à sa lecture



Source : Météo-France (données station Montsouris), CMIP6, modélisations françaises (projections climatiques), 2020

Lecture du graphique

Évolution passée depuis 1880 à la station Paris-Montsouris (ligne noire) et projections futures pour la région de Paris selon 3 trajectoires jusqu'à 2100. Les lignes rouge, jaune et bleue représentent la médiane des

projections tandis que les plages de couleur les entourant indiquent la répartition des incertitudes entre les percentiles 5 et 95.

2.7 Limites de l'exercice et précautions d'emploi

Les données de projection produites dans le cadre de cet exercice doivent être interprétées avec prudence :

- Les données futures sont à une maille de 50km du fait du choix effectué en faveur des modèles globaux (CMIP 6) ;
- La résolution est donc grossière et comprend une large part d'espaces non urbanisés ; Au-delà des propres limitations des modèles climatiques (pas de prise en compte de l'îlot de chaleur), s'ajoute donc des limites liées à la résolution de l'analyse ;
- Il est ainsi fort probable que les évolutions liées aux indicateurs de température soient sous-estimées ;
- Cet exercice ne remplace aucunement un travail de modélisation fine du climat urbain incluant notamment l'effet d'îlot de chaleur. Il donne néanmoins des indications importantes sur les évolutions tendancielles et les incertitudes futures ;
- Les travaux complémentaires mobilisés permettent souvent de compléter l'analyse.

3. EVOLUTIONS DES ALEAS LIES AUX TEMPERATURES

Les parties à venir présentent les résultats intégrés (projections et travaux complémentaires) pour Paris. Elles passent en revue les aléas climatiques servant l'actualisation de l'indice de risque des systèmes parisiens. Ce chapitre est plus particulièrement dédié aux aléas tendanciels et extrêmes liés aux températures. Nous rappelons le fait que les résultats des modèles climatiques sous-estiment très probablement les tendances à l'œuvre pour Paris.

3.1 Un îlot de chaleur urbaine amplifiant les enjeux de température

L'environnement urbain est soumis à des températures plus élevées que son environnement périphérique moins urbanisé (EPICEA, Météo-France, CSTB, Ville de Paris, 2007). Cet effet local, appelé îlot de chaleur urbaine, est principalement dû à la forte minéralisation des espaces et à une concentration importante des activités humaines. Il est plus prononcé pendant la nuit que le jour. Les écarts de température entre la ville et les campagnes environnantes peuvent aller de quelques degrés jusqu'à + 10°C de différence. Cette différence de températures est aussi appelée « intensité » de l'îlot de chaleur urbaine.

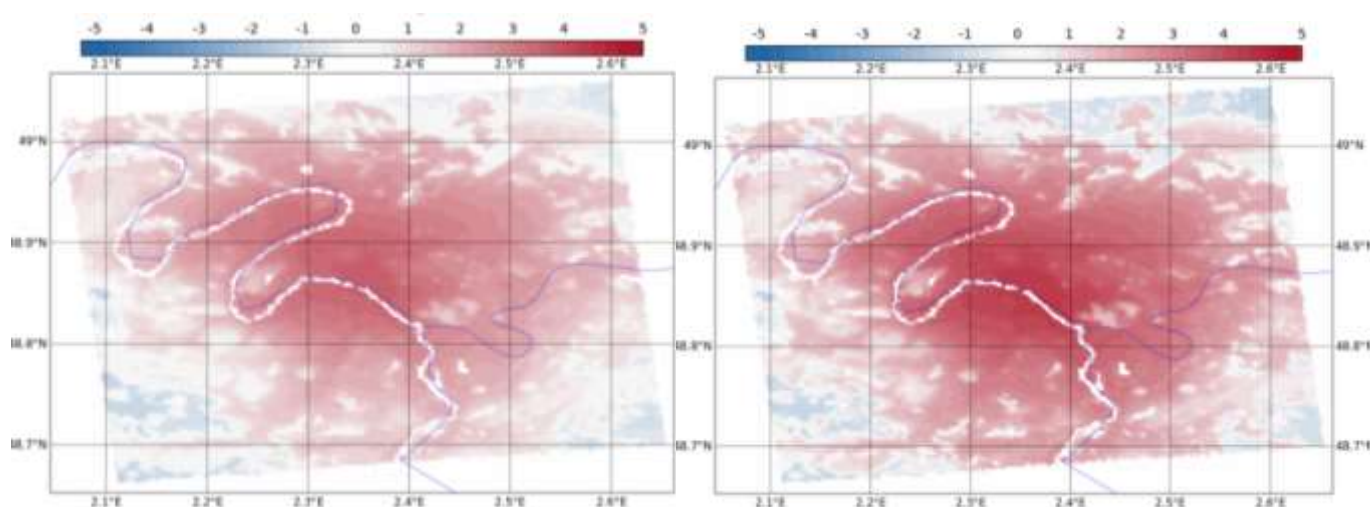
Il se manifeste tout au long de l'année. A l'échelle annuelle, **le différentiel nocturne entre Paris et sa campagne se situe entre + 2° et 3°C** (Météo-France, APC, 2013). L'intensité moyenne de l'îlot de chaleur urbaine pour Paris, mesurée en écart de température moyenne par rapport à l'environnement rural, est modélisée ci-après (**Figure 14**) sur la période 2008-2017 pour les nuits hivernales (à gauche) et les nuits estivales (à droite). L'îlot de chaleur apparaît sans surprise plus intense au cœur de l'agglomération en été qu'en hiver. Problématique en période caniculaire, il peut jouer un rôle bénéfique en période hivernale au regard du bilan énergétique global de la ville (APUR, novembre 2015).

En ce qui concerne la période estivale, pour la décennie passée, celui-ci se matérialise par un différentiel nocturne d'environ **5°C pour la capitale**. Cette intensité moyenne masque bien évidemment des disparités spatiales (quartiers plus ou moins frais) et temporelles, l'îlot de chaleur étant amplifié quand les conditions météorologiques sont favorables (conditions anticycloniques estivales notamment).

Figure 14 : Intensité de l'îlot de chaleur urbaine nocturne pour Paris en été et en hiver

Intensité moyenne nocturne en Hiver
(2008-2017)

Intensité moyenne nocturne en Eté
(2008-2017)



Remarque : La modélisation utilise ici les données de réanalyse ERA5 et le modèle UrbClim®

Source : Copernicus Climate Change service (C3S), 2020.

L'intensité de l'îlot de chaleur n'étant pas modélisée dans le cadre des projections climatiques, les résultats tendront de fait à sous-estimer cet effet. Les projections devraient être complétées par un exercice de modélisation urbaine approfondie.

3.2 Températures moyennes : un réchauffement qui se poursuit et s'accélère

3.2.1 Températures moyennes

Données produites

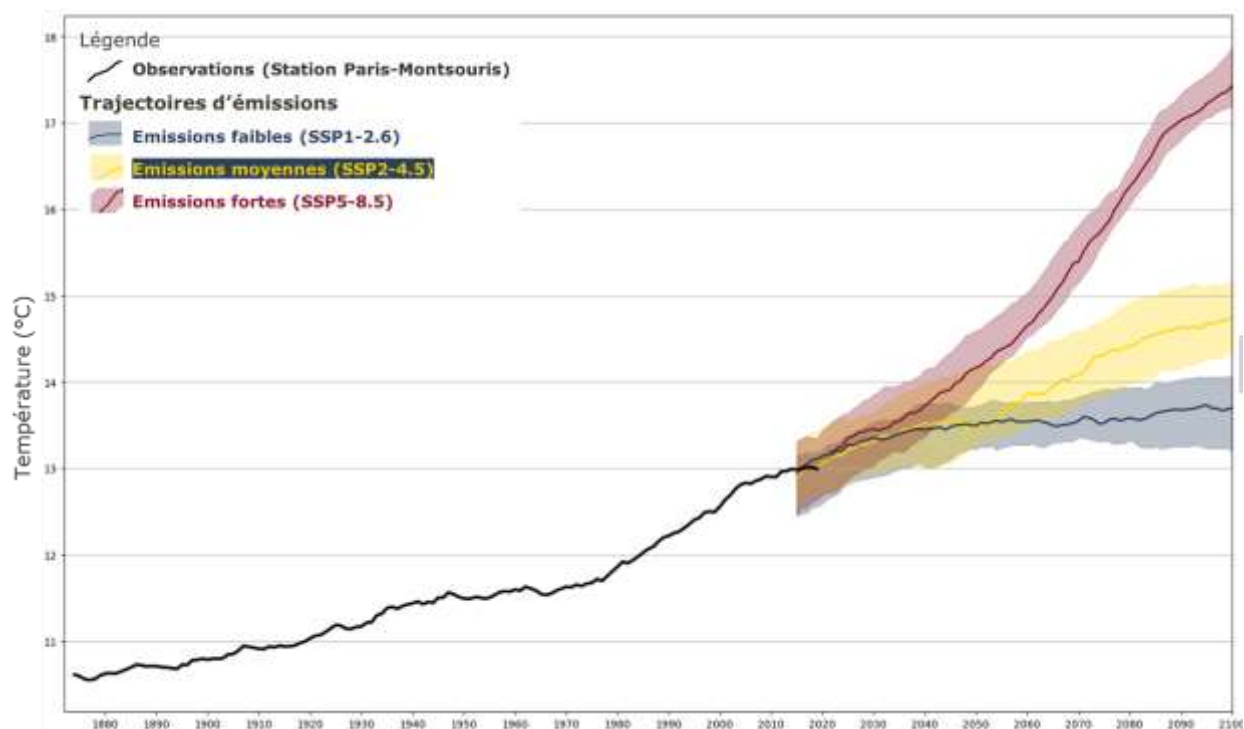
Le climat parisien s'est largement réchauffé sur le siècle dernier (**Figure 15 ; Figure 16**). La moyenne observée sur la période 2010 est de 13°C (quand elle était de 10,7°C sur la période 1885. Cette hausse se poursuit et semble s'accélérer dans les deux dernières décennies avec un **dépassement franchi des 2°C par rapport à 1885** (1871-1900).

Figure 15 : Evolution passée et projections futures des températures moyennes quotidiennes (°C/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
10,7°C	12°C	13°C	13,2°C (13,3°C;13,4°C)	13,4°C (13,4°C;14,1°C)	14,5°C (13,6°C;16,6°C)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Figure 16 : : Evolution passée et projections futures des températures moyennes quotidiennes (°C/an) pour Paris



Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Evolutions passées

Données produites :

Ainsi en 2010 (2001-2019), on constate déjà une hausse de 2,3°C par rapport à 1885 (1871-1900) dont 1°C acquis depuis 1985 (1971-2000).

Travaux complémentaires :

Selon Météo-France en 2018, **les cinq années les plus chaudes (2011, 2014, 2015, 2017 et 2003) ont été observées au XXI^e siècle. On peut désormais ajouter à cette analyse l'année 2019.**

Quant à l'échelle saisonnière, l'été tend à se réchauffer plus vite, suivi du printemps puis des autres saisons. Quelques années remarquables par saison sont présentées par Météo-France dans le tableau ci-après (**Figure 17**).

Figure 17 : Années remarquables pour les températures à Paris

HIVER	▶ Hiver le plus froid : 1962/1963 ▶ Hiver le plus doux : 2006/2007 et 2015/2016. Les 10 hivers les plus doux ont été observés à partir de la fin des années 1980, sauf l'hiver 1974/1974. ▶ Beaucoup de variabilité d'une année sur l'autre	▶ Les automnes 2006 et 2014 ont été exceptionnellement chauds avec des températures dépassant de plus de 3 degrés les normales saisonnières ▶ Les 5 automnes les plus chauds ont été observés au XXI^e siècle : 2006, 2014, 2011, 2005 et 2009.	AUTOMNE
	▶ Les 3 printemps les plus doux ont été observés ces 15 dernières années : 2003, 2007 et 2011. ▶ Aux printemps 2011 et 2007, les températures, exceptionnellement chaudes, ont dépassé de plus de 2 °C les normales saisonnières.	▶ L'été le plus chaud reste 2003. Les températures ont dépassé de près de 4 °C les normales de saison. ▶ Les 5 étés les plus frais ont été observés avant 1980.	ETE

Source : Météo-France, Paris face au changement climatique, dossier presse, 8 juin 2018.

Projections futuresDonnées produites

Les projections futures pour Paris indiquent une **forte convergence des résultats entre les trajectoires pour les horizons court et moyen termes** avec une température moyenne en hausse respectivement de 2,5°C (2,6°C ; 2,7°C) en 2030 à 2,7°C (2,7°C ; 3,4°C) en 2050 par rapport à 1885 (1871-1900).

A long-terme les incertitudes sont plus avec une élévation sous trajectoire « émissions moyennes » aux alentours de 3,8°C mais pouvant aller jusqu'à +6°C dans la trajectoire « fortes émissions ». Seule une trajectoire « faibles émissions » permettrait de stabiliser les émissions à l'horizon 2085 (2071-2100).

Travaux complémentaires

Dans l'exercice effectué par Météo-France avec les anciennes projections (**Figure 18** : projections saisonnières du réchauffement à long-terme à Paris), le constat saisonnier à long-terme est plutôt cohérent avec les projections actualisées par cette étude et les observations en cours (réchauffement plus important en été qu'en hiver).

Figure 18 : projections saisonnières du réchauffement à long-terme à Paris

HIVER	▶ Des hivers de plus en plus doux ▶ Poursuite du réchauffement jusqu'aux années 2050, quel que soit le scénario ▶ Sur la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, l'évolution diffère significativement selon le scénario considéré : jusqu'à + 4 °C à l'horizon 2071-2100 sans politique climatique.	▶ Des étés toujours plus chauds ▶ Poursuite du réchauffement estival jusqu'aux années 2050, quel que soit le scénario ▶ Sur la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, l'évolution diffère significativement selon le scénario considéré : jusqu'à + 5 °C à l'horizon 2071-2100 sans politique climatique.	ETE
--------------	--	--	------------

Source : Météo-France, Paris face au changement climatique, dossier presse, 8 juin 2018.

3.2.2 Températures maximales

Données produites

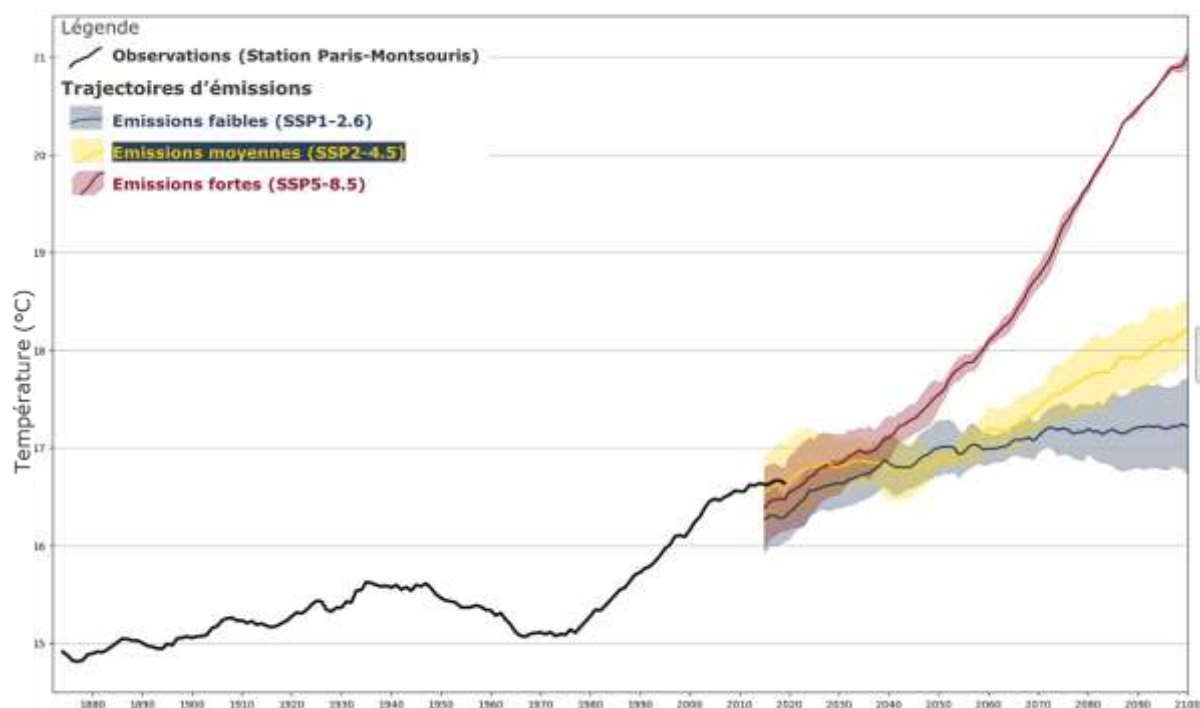
Les températures maximales ([Figure 19](#); [Figure 20](#)) ont peu évolué au cours de la première moitié du XXe siècle. Elles connaissent cependant une augmentation particulièrement forte sur les dernières décennies (+1,1°C entre les horizons 1985 et 2010). Elles vont continuer d'augmenter à tous les horizons temporels et quelles que soient les trajectoires (+2,8°C pour la trajectoire « émissions intermédiaires » à l'horizon 2085 par rapport à 1885).

Figure 19 : Evolution passée et projections futures des températures maximales quotidiennes (°C/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
15°C	15,5°C	16,6°C	16,8°C (16,6°C ; 16,8°C)	16,9°C (17°C ; 17,5°C)	17,8°C (17,2°C ; 20,1°C)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Figure 20 : Evolution passée et projections futures des températures maximales quotidiennes (°C/an) pour Paris



Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

3.3 Fortes chaleurs, un enjeu de plus en plus critique

Corollaire de l'augmentation des températures, **la fréquence et l'intensité des épisodes de fortes chaleur et canicules vont s'élever dans le futur, pour devenir un problème urbain critique**, l'effet d'îlot de chaleur étant par ailleurs sous-estimé par les modèles climatiques. Tous les indicateurs convergent en ce sens.

3.3.1 Journées estivales

Le nombre moyen de journées estivales (

Figure 21) correspond au nombre de journées où la température maximale est supérieure à 25 °C. En 2010, on note environ 15 jours de plus comparativement à 1880 avec une augmentation notable dans une période récente (entre les horizons 1985 et 2010). **Les années 2003 et 2018 sont les années ayant connu le plus grand nombre de journées estivales d'après Météo-France** (Climat^{HD}).

Données produites

En lien avec la poursuite du réchauffement, les projections montrent une augmentation assez similaire d'une trajectoire à l'autre aux horizons 2030 et 2050. **Il y aurait environ 2 mois de journées estivales pour ces deux horizons.** A l'horizon 2085, les écarts sont plus grands et le nombre de journées estivales s'accroît encore pour atteindre **environ 74 jours** par an pour la trajectoire « émissions moyennes » et 98 pour la plus extrême.

Figure 21 : Evolution passée et projections futures du nombre de journées estivales avec température $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (jours/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
39j	41,4j	54,8j	60,2j (59,1j ; 59,3j)	62,3j (64,8j ; 72,8j)	73,2j (68j ; 98j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

3.3.2 Jours très chauds

Données produites

Le nombre de jours très chaud (**Figure 22**) correspond au nombre de jour où la température maximale est supérieure à 30°C . Ce nombre devrait devenir plus fréquent à l'avenir. **Il atteindrait 22 jours en 2050 et 35 jours à la fin du siècle** selon la trajectoire « émissions moyennes » contre 14 jours en moyenne aujourd'hui et 7 jours en 1885 (1871-1900).

Figure 22 : Evolution passée et projections futures du nombre de jours très chauds avec température $\geq 30^{\circ}\text{C}$ (jours/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
7,2j	8,2j	13,6j	19,7 j (19j;21,4j)	21,8j (26,7j;29,6j)	34,1j (26,2j;57,9j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

3.3.3 Nuits tropicales

Données produites

Les nuits tropicales (**Figure 23**) représentent des nuits d'été où la température est supérieure à 20°C . Ces nuits, peu nombreuses au siècle dernier, vont devenir plus fréquentes quels que soient la trajectoire et l'horizon, pour atteindre **20,5 nuits à l'horizon 2050** pour la trajectoire « émission moyennes » contre 5 actuellement. A long-terme le seuil des 30 jours serait dépassé et pour la trajectoire la plus extrême, on atteindrait 2 mois.

Figure 23 : Evolution passée et projections futures du nombre de nuits tropicales (j/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
0,2j	3,5j	5j	17,8j (14,9j;18,8j)	20,5j (22,6j;30j)	34,8j (24,3j;69,1j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

3.3.4 Température maximale du jour le plus chaud

Données produites

La température maximale du jour le plus chaud (**Figure 24**) est un indicateur permettant d'approcher l'intensité du réchauffement. Il s'agit d'une moyenne sur la période considérée. Alors que dans le siècle dernier cette valeur était plutôt stable, on constate que dans une période récente (2010), **l'intensité a augmenté de 3°C environ pour passer de 33°C à 36°C** . Compte

tenu de l'absence de représentation de l'îlot de chaleur urbaine dans les modèles globaux CMIP6, **on peut émettre l'hypothèse que l'intensité future est très certainement sous-estimée.**

Figure 24 : Evolution passée et projections futures de la température maximale pour le jour le plus chaud (°C/an) pour Paris

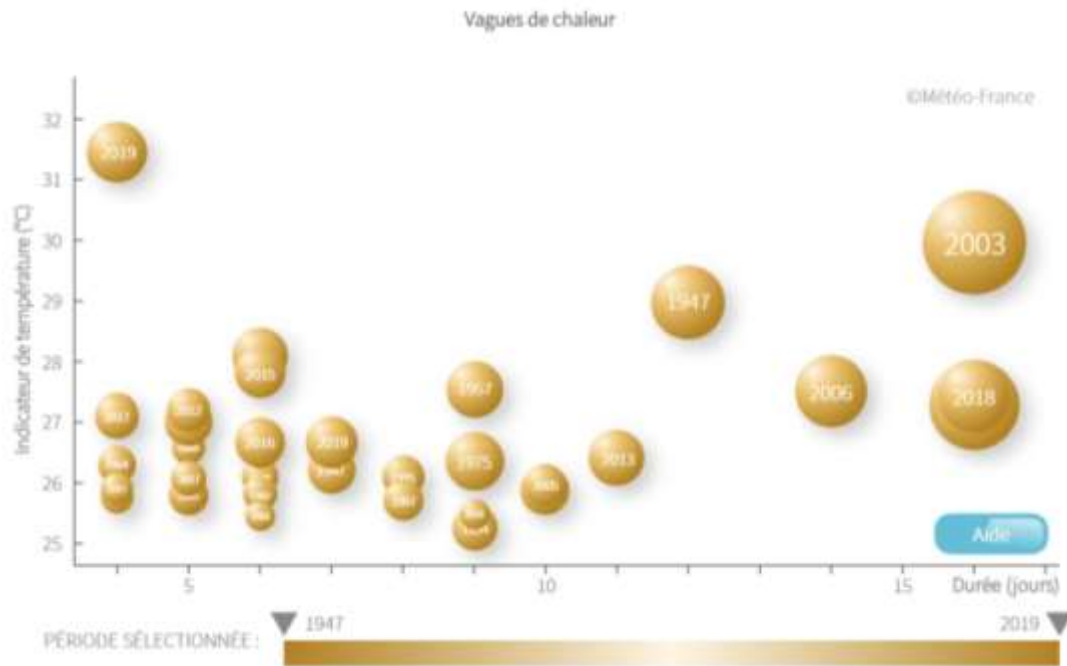
1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
33°C	33°C	36°C	35°C (34,7°C;35°C)	36°C (35.5°C;36.5°C)	37°C (35.6°C;41°C)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

3.3.5 Vagues de chaleur et canicules

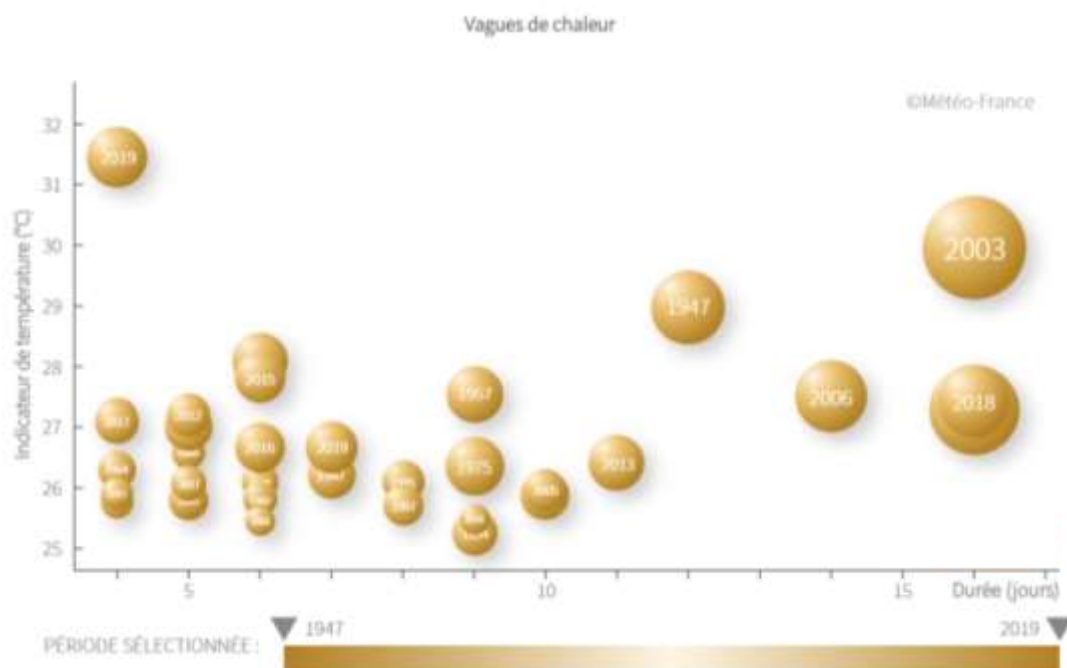
Travaux complémentaires

Les vagues de chaleur (

Figure 25 : les vagues de chaleur observées depuis 1947 en Ile-de-France (en durée et en intensité)

Source : Climat HD, Météo-France, 2020.

) correspondent à une période d'au moins cinq jours consécutifs avec une température maximale quotidienne dépassant de plus de 5 °C la normale climatique. Recensées depuis 1947 en Ile-de-France par Météo-France, elles ont été sensiblement plus nombreuses au cours des dernières décennies. La canicule de 2003 est la plus sévère survenue sur la région et c'est durant l'épisode du 23 au 26 juillet 2019 qu'a été observée la journée la plus chaude depuis 1947. Celle de 2020, absente du graphique, est la troisième canicule la plus importante.

Figure 25 : les vagues de chaleur observées depuis 1947 en Ile-de-France (en durée et en intensité)

Source : Climat HD, Météo-France, 2020.

Travaux complémentaires

D'après l'étude menée par APC-Météo France en 2015 pour Paris, il est attendu en fin de siècle une forte augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur. **Cette augmentation serait comprise entre 21 à 94 jours par an, contre 7 jours en moyenne toutes saisons confondues aujourd'hui.** On s'attend également à une augmentation **du nombre de jours de canicule** (moyenne de la température minimale sur trois jours supérieure à 21 °C et moyenne de la température maximale sur trois jours supérieure à 31 °C) qui atteindrait **3 à 26 jours par an**, au lieu d'un jour en moyenne aujourd'hui.

Les vagues de chaleur pourraient donc être plus fréquentes mais aussi plus sévères et plus longues. Elles pourraient aussi se produire sur une période plus longue (du printemps à l'automne).

3.4 Une diminution des grands froids

Corollaire de l'augmentation des températures, **la fréquence et l'intensité des épisodes de grands froids va fortement diminuer.** Des épisodes froids se produiront encore à Paris, mais moins fréquemment.

3.4.1 Températures minimales

Données produites

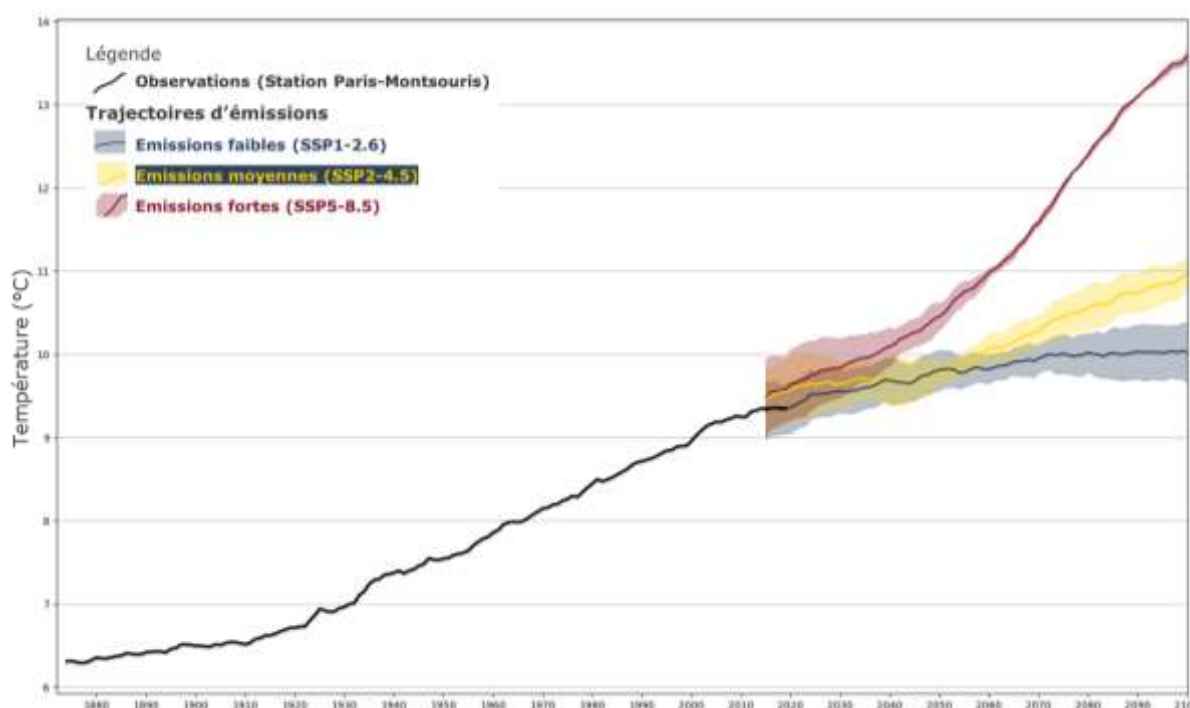
Les températures minimales (**Figure 26 ; Figure 27**) se réchauffent plus vite que les températures maximales et moyennes. Entre les périodes 1885 et 1985, elles ont ainsi augmenté de 2,2°C. La densification, l'artificialisation de Paris sur le siècle dernier constitue des facteurs aggravants du réchauffement.

Elles continueront de s'élever dans le futur pour atteindre 9,8°C en 2050 (trajectoire « émissions moyennes ») contre 6,4°C en 1885. Si ces conditions peuvent être favorables à une diminution de l'intensité du froid, elles sont aussi défavorables au rafraîchissement nocturne de la ville, particulièrement important en raison de l'îlot de chaleur urbaine.

Figure 26 : Évolution passée et projections futures des températures minimales quotidiennes (°C/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
6,4°C	8,6°C	9,3°C	9,6°C (9,5°C;9,8°C)	9,8°C (9,8°C;10,4°C)	10,6°C (10°C;12,7°C)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Figure 27 : Evolution passée et projections futures des températures minimales quotidiennes (°C/an) pour Paris

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

3.4.2 Température minimale du jour le plus froid

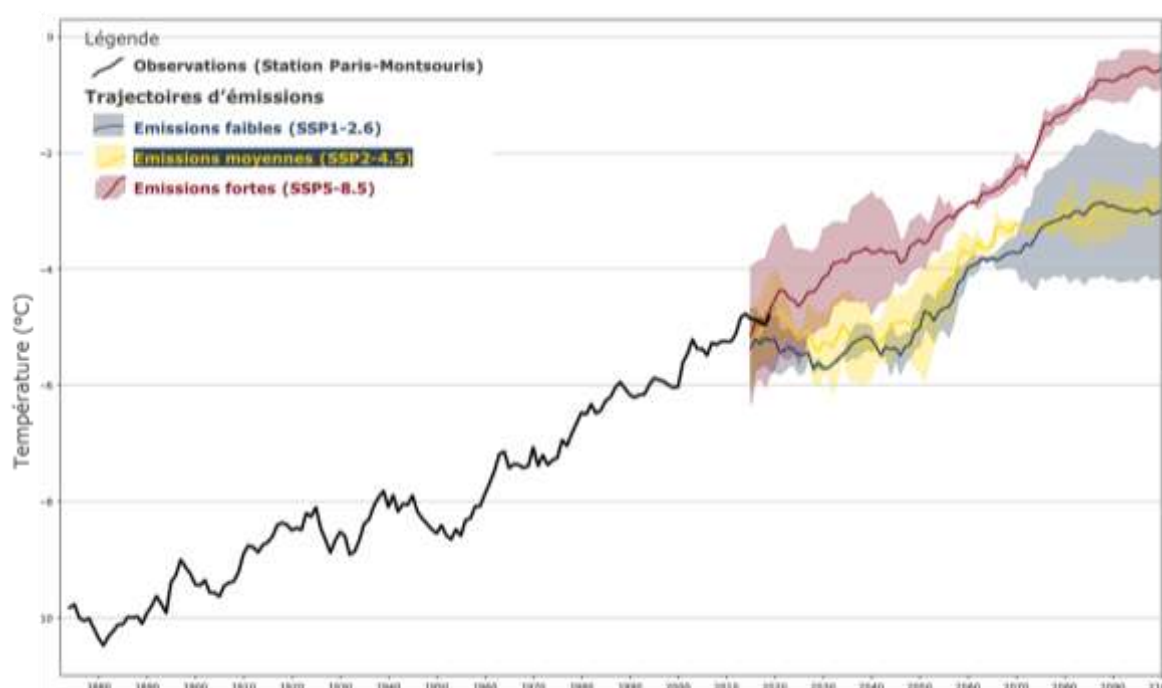
Données produites

La température minimale du jour le plus froid (**Figure 28 ; Figure 29**) est un indicateur d'intensité des froids extrêmes. Les observations indiquent un réchauffement d'environ 3,8°C entre 1885 et 1985. Cette tendance semble s'accélérer dans la période récente 2010 pour atteindre une valeur de température de -4,9°C contre -10,1°C en 1885. Il semblerait que cette augmentation de la température minimale se poursuivre dans le futur avec une élévation très marquée dans la trajectoire la plus extrême (température proche de la valeur 0). Les modélisations ne tiennent pas compte de l'îlot de chaleur urbaine.

Figure 28 : Evolution passée et projections futures de la température minimale du jour le plus froid (°C) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
-10,1°C	-6,3°C	-4,9°C	-5,4°C (-5,8°C;-3,4°C)	-5°C (-5,1°C;-3,6°C)	-3,3°C (-3,1°C;-1°C)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Figure 29 : Evolution passée et projections futures de la température minimale du jour le plus froid (°C/an) pour Paris

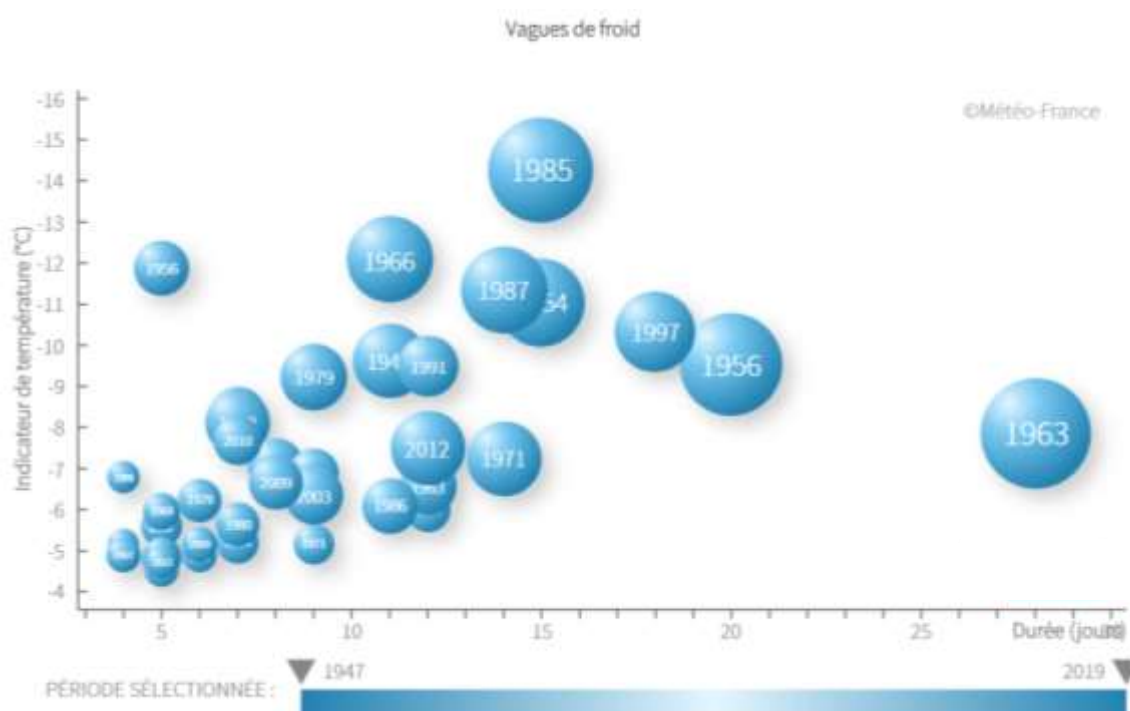
Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

3.4.3 Vagues de froid

Travaux complémentaires

D'après Météo-France (

Figure 30), les vagues de froid recensées depuis 1947 en Île-de-France ont été sensiblement moins nombreuses au cours des dernières décennies. Cette évolution est encore plus marquée depuis le début du siècle avec **des épisodes devenant progressivement moins intenses et moins sévères**. Les plus sévères vagues de froid se sont toutes produites avant 2000.

Figure 30 : les vagues de froid observées depuis 1947 en Ile-de-France (en durée et en intensité)

Source : Climat HD, Météo-France, 2020.

D'après Météo-France (Météo-France, 2018), si les vagues de froid diminuent en nombre, en intensité et en durée on ne peut toutefois pas exclure totalement le risque de vague de froid exceptionnel en 2050.

3.5 Une baisse des enjeux liés à la neige et au verglas

3.5.1 Nombre de jours de gel

On observe, en cohérence avec l'augmentation des températures, **une diminution du nombre de jours de gel (Figure 31 ; Figure 32), ces jours étant divisés approximativement par 2 entre 1885 et 1985** (de 54 à 25 jours) avec une forte variabilité interannuelle. Météo-France note que 2002, 2000 et 1994 et 2014 ont été parmi les années les moins gélives observées sur l'Île-de-France depuis 1959 confirmant la réduction observée dans une période récente (19 jours en moyenne de gel).

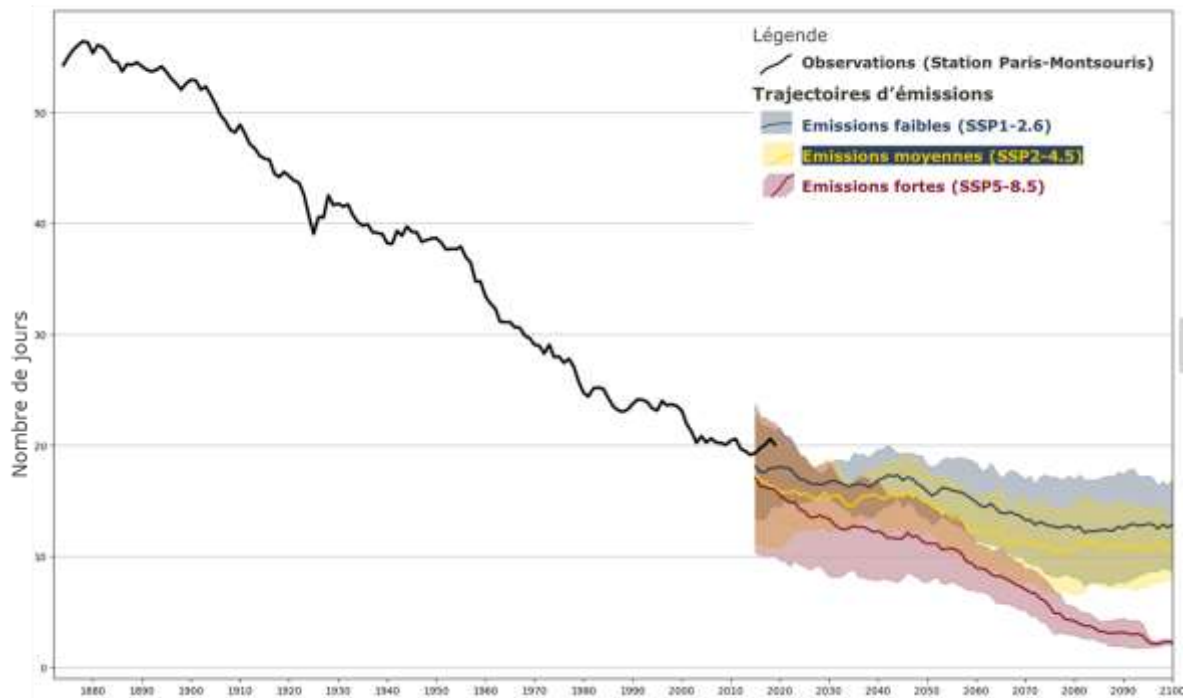
Cette baisse devrait se poursuivre avec peu d'incertitude à l'horizon 2050 : environ 18 jours de gel par an. A plus long-terme cette tendance sera particulièrement marquée pour la trajectoire « émissions fortes » avec une moyenne de 6 jours seulement de gel par an.

Figure 31 : Evolution passée et projections futures du nombre de jours de gel (température minimale ≤ 0°C) (j/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
54,6j	24,3j	19,3j	18,3 j (19,7j;16,3j)	17,8j (18,8j;14,1j)	14,1j (15,3j;6,2j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Figure 32 : Evolution passée et projections futures du nombre de jours de gel (température minimale $\leq 0^{\circ}\text{C}$) (j/an) pour Paris



Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

3.5.2 Nombre de jours sans dégel

En cohérence avec l'indicateur précédent, les jours sans dégel ([Figure 33](#) ;

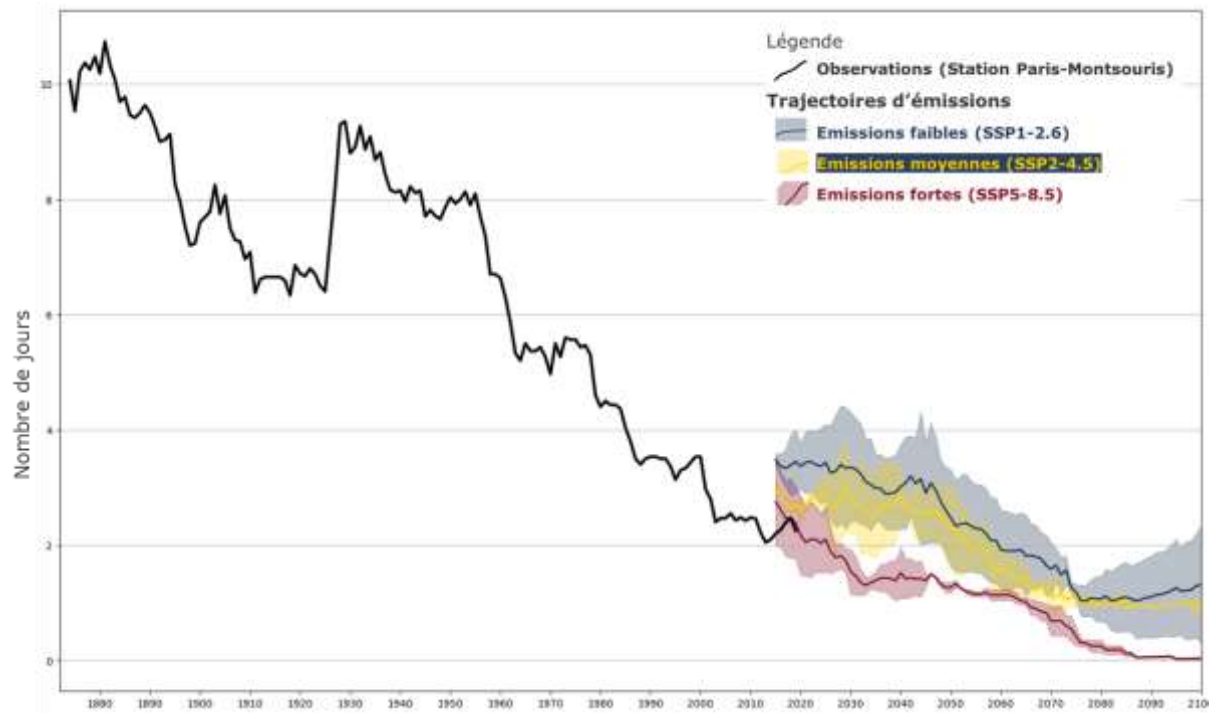
Figure 34) pouvant créer des enjeux autour de la persistance de la neige ou du verglas notamment, devrait diminuer. Autour de 10 jours en 1885, ils sont aujourd'hui de l'ordre de 2 jours par an. A l'avenir, ils devraient diminuer légèrement ou se maintenir à l'horizon 2050 voire totalement disparaître dans le cadre d'une trajectoire plus extrême en fin de siècle.

Figure 33 : Evolution passée et projections futures du nombre de jours sans dégel (température maximale $\leq 0^{\circ}\text{C}$) (j/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
9,8j	4j	2,2j	2,7 j (3,2j; 1,4j)	2,2j (2,3j;1,1j)	1j (3j ;0j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Figure 34 : Evolution passée et projections futures du nombre de jours sans dégel (température maximale $\leq 0^{\circ}\text{C}$) (j/an) pour Paris



Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

4. EVOLUTION DES ALEAS LIES AUX PRECIPITATIONS

Contrairement aux températures, les indicateurs relatifs aux précipitations sont plus variables et incertains. Néanmoins des signaux liés aux changements climatiques se dégagent.

4.1 Une modification du régime de précipitations

4.1.1 Volume des précipitations

Données produites

Le cumul pluviométrique annuel (**Figure 35**) est très variable sur le siècle passé mais il indique toutefois une légère augmentation des cumuls. D'après Météo-France (2018), la répartition saisonnière de ces évolutions montre que les automnes sont légèrement plus secs tandis que les autres saisons sont plus humides, notamment l'hiver.

Les projections futures tendent à converger vers la poursuite de cette augmentation annuelle à partir de 2050 et en fin de siècle avec respectivement 679 mm et 721 mm pour la trajectoire « émissions moyennes » contre 635 mm actuellement. Ces résultats sont entourés de plus fortes incertitudes, le signal étant plus dispersé.

Figure 35 : Evolution passée et projections futures du cumul pluviométrique annuel (en mm/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
551 mm	640 mm	635 mm	633mm (667-674)	679mm (658;678)	721mm (645-742)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Travaux complémentaires

D'après l'étude APC-Météo-France (2015), il existe une tendance future à baisse des précipitations en été pour la plupart des modèles (environ 6 à 25% pour un cumul actuel de 165mm) et une hausse du cumul en hiver de l'ordre de 8 à 46% pour un cumul actuel de 150 mm.

4.1.2 Nombre de jours de pluie

Données produites

Si le nombre de jours de pluie (**Figure 36**) a augmenté sur le siècle passé, **il devrait diminuer légèrement** dans le futur pour atteindre un niveau comparable à celui de 1885 soit environ 105 jours.

Figure 36 : Evolution passée et projections futures du nombre de jours de pluie (cumul de précipitations ≥ 1 mm) (j/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
104j	111j	109j	105j (108j;110j)	108j (108j;108j)	105j (106j;105j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

En résumé, pour le XXIème siècle, alors que le volume de précipitations devrait légèrement augmenter le nombre de jours de pluie sera plutôt à la baisse ce qui indique **une tendance à l'augmentation de l'intensité des précipitations**.

4.2 La question des fortes pluies et des inondations

Les fortes pluies peuvent se matérialiser sous différentes formes, notamment par des séquences très intenses et de courte durée (entre 1 heure et un jour) ou à contrario par des séquences de précipitations continues sur plusieurs jours. En tenant compte des conditions saisonnières, ces deux types de pluie peuvent engendrer différents types d'inondation : inondations par ruissellement plutôt localisées lors de phénomènes de courte durée, inondations plus conséquentes par débordement de cours d'eau dans le cadre d'une pluie continue ou phénomènes de remontée de nappes, ces phénomènes pouvant par ailleurs être concomitants.

4.2.1 Pluies intenses et orages estivaux

Travaux complémentaires

Les pluies intenses sont donc des précipitations qui apportent sur une courte durée une importante quantité d'eau. Ces pluies peuvent engendrer des inondations éclaires, favorisées par un sol asséché et propice au ruissellement. Ces pluies sont généralement observées pendant la période estivale sur Paris.

Dans le cadre de la présente étude, il n'a pas été possible d'approcher les pluies de forte intensité sur une courte durée en raison de la maille de l'étude (50km) et de la grande variabilité spatio-temporelle de tels événements.

D'après l'étude APC-Météo-France (2015), **les résultats des différents modèles ne permettent pas de dégager une tendance significative pour les précipitations estivales ni pour les pluies extrêmes** (cumul de précipitations supérieur à 30 mm en 1 heure). Il n'est donc pas possible d'établir des conclusions précises sur l'occurrence future des pluies intenses d'été.

Les travaux de l'ONERC (2018) viennent confirmer « qu'il n'est pas possible de tirer de conclusion concernant les effets du changement climatique sur les phénomènes orageux et donc aussi en particulier sur l'intensité des pluies plus extrêmes associées à ces épisodes ».

4.2.2 Pluies intenses hivernales et inondations par crue de la Seine

Travaux complémentaires

Comme mis en évidence, il existe par contre un signal à l'augmentation des précipitations intenses surtout en période hivernale. Les travaux de l'ONERC (2018), viennent confirmer ces hypothèses en affirmant également une tendance à l'intensification des pluies hivernales sur la France quel que soit le scénario et l'horizon temporel (moyen ou long termes).

Les crues de plaine que connaît Paris se produisent généralement en hiver. Des pluies abondantes entraînent une saturation progressive des sols et une montée lente des eaux voire des débordements.

Données produites

Pour caractériser plus précisément les épisodes de pluie intense de longue durée, nous nous intéressons à deux indicateurs, un relatif au volume, l'autre relatif à la durée.

Les précipitations intenses sur plusieurs jours consécutifs sont en général des phénomènes se produisant à des échelles larges (voire sur toute la France) et sont principalement responsables des inondations par débordement des fleuves. Il existe un signal passé à l'augmentation du volume sur 5 jours consécutifs (**Figure 39**) mais aussi futur même si celui-ci reste léger.

Figure 39 : Evolution passée et projections futures du cumul de précipitations maximales sur 5 jours consécutifs (mm/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
49 mm	60 mm	63 mm	64mm (68 ;61)	64 mm (62 ;66)	69 mm (66 ;80)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Alors qu'il existe un signal à la hausse du volume, la durée de jours consécutifs de pluie ne devrait pas augmenter mais rester stable (**Figure 40**). Ces caractéristiques s'appliquent notamment pour la période hivernale, comme le souligne les travaux APC/Météo France de 2015 (source :[APC](#)).

Figure 40 : Evolution passée et projections futures du nombre maximum de jours de pluies consécutifs (maximum de jours consécutifs avec cumul de précipitations ≥ 1 mm (j/an) pour Paris

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
7,2j	7,4j	6,8J	6,8j (6,7j ;7,5j)	7j (6,3j ;7,5j)	7,4j (7,2j ;7,6j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

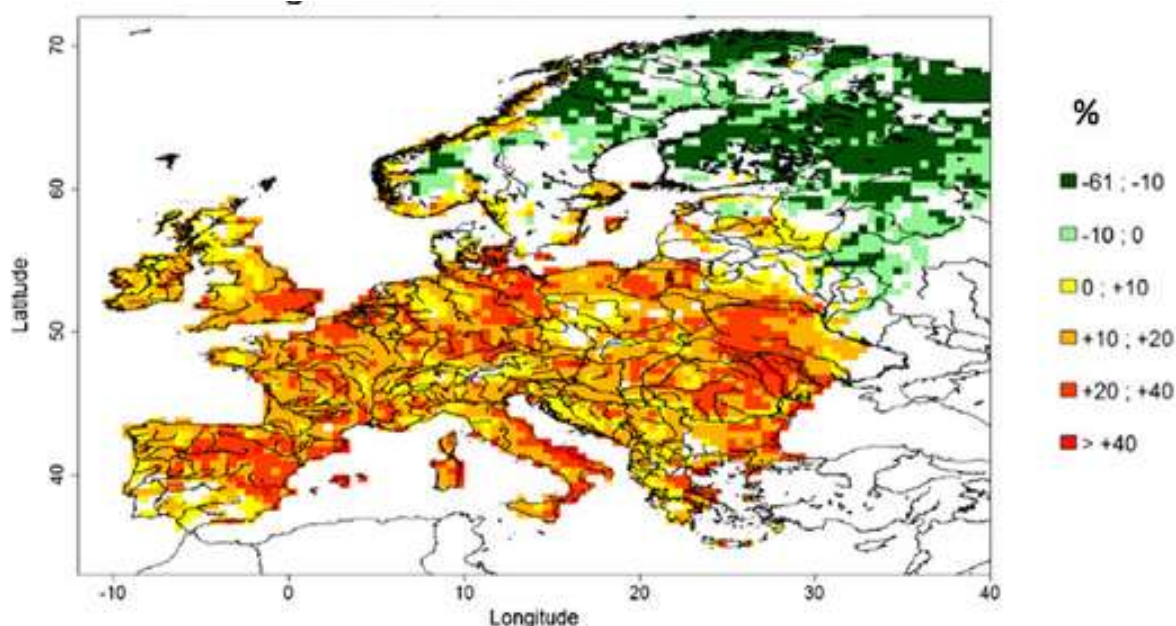
Travaux complémentaires

Des travaux approfondis de modélisation future des précipitations intenses et inondations en Europe (Roudier, 2016) viennent appuyer ces signaux. Ce travail s'appuie sous un scénario de réchauffement à +2°C (le scénario intermédiaire du présent exercice) et combine modélisation régionale du climat (11 modèles) et modélisation hydrologique (3 modèles). Il étudie notamment le changement de débit de crues décennale et centennale pour la période la période de 30 ans où les +2°C sont atteints comparativement à la situation de référence. Le signal y apparaît clair et robuste avec une augmentation du débit des crues décennale (

Figure 41)

Figure 41 : Changement de débit de crue décennale en Europe entre la période de référence 1970-2000 et un monde à +2°C et centennale (**Figure 42**) dans toute l'Europe du Sud. **Sur le bassin de la Seine**, on s'attend à une augmentation du débit plus marqué sur le signal centennal (+20 à +40%) que sur le signal décennale (+10 à +20%). **L'intensité des crues, qu'elles soient décennales ou centennales devrait donc augmenter.**

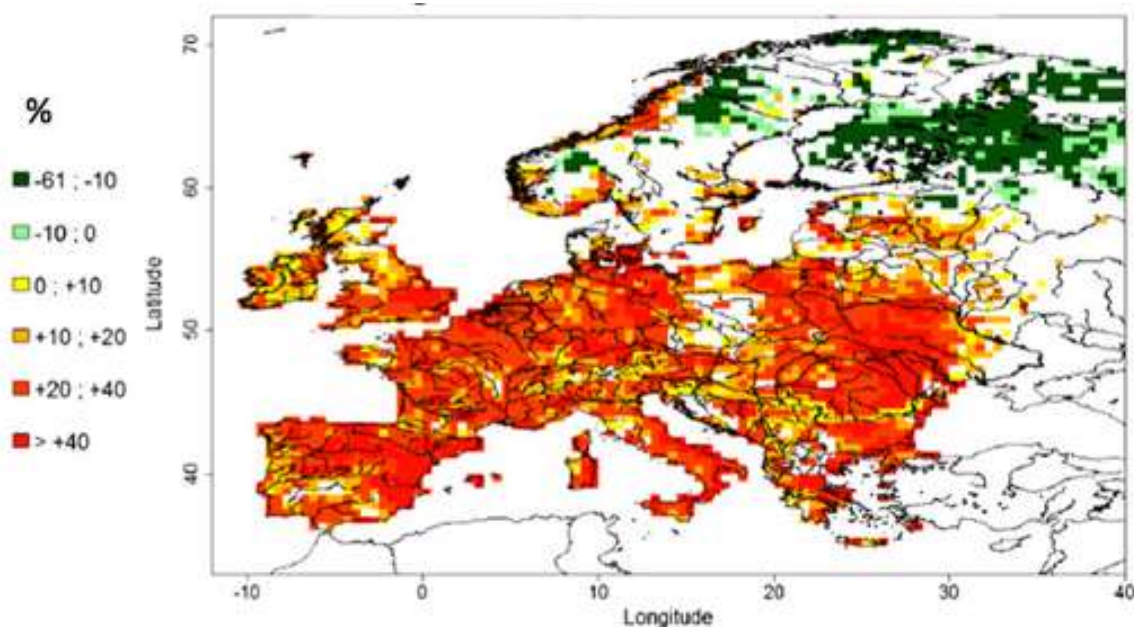
Figure 41 : Changement de débit de crue décennale en Europe entre la période de référence 1970-2000 et un monde à +2°C



Simulation d'évolution du débit des crues décennales et centennales en Europe entre la période 1970-2000 (référence) et la période de 30 ans quand le réchauffement global atteint 2 °C dans les projections climatiques (résultat médian de 3 modèles hydrologiques forcés par 11 simulations climatiques régionales issues de différents scénarios).

Source : Roudier et al., 2016.

Figure 42 : Changement de débit de crue centennale en Europe entre la période de référence 1970-2000 et un monde à +2°C



Simulation d'évolution du débit des crues décennales et centennales en Europe entre la période 1970-2000 (référence) et la période de 30 ans quand le réchauffement global atteint 2 °C dans les projections climatiques (résultat médian de 3 modèles hydrologiques forcés par 11 simulations climatiques régionales issues de différents scénarios).

Source : Roudier et al., 2016.

Enfin la caisse Centrale de Réassurance (CCR) a réalisé en 2018, en partenariat avec Météo-France, une étude de modélisation des risques liés au changement climatique. Il existe ainsi une

modélisation nationale du risque inondation à l'horizon 2050 pour l'ancien scénario RCP8.5 correspondant à la trajectoire « fortes émissions » du présent exercice. La modélisation réalisée met en exergue l'évolution des cumuls de pluies lors des événements extrêmes. **Ainsi, pour les cumuls de pluie sur 72 h de période de retour 50 ans, la hausse pourrait atteindre entre 10 et 16% sur le bassin Seine Amont.** Ces mêmes travaux estiment **une augmentation entre 20 et 50% de probabilité de survenance de débordement et de ruissellement** sur ce même bassin conduisant potentiellement à une extension des surfaces inondées.

Paris fait également face à des **crues de printemps**, comme celle à cinétique rapide de mai/juin 2016 (supérieure à 6 mètres).

Le projet Extremoscope réalisé par l'Institut Pierre-Simon Laplace et Météo-France a regardé **l'épisode de pluies extrêmes de mai 2016**, caractérisé par 3 jours de pluies quasi-continues sur le centre de la France, occasionnant des inondations dans les bassins de la Loire et de la Seine, notamment sur plusieurs affluents. La valeur de crue la plus haute à Paris de la Seine était atteinte le 4 juin 2016, avec 6,10 m. Il faut remonter à 1982 pour retrouver des valeurs aussi hautes de la Seine (6,15 m), mais on est loin des valeurs records de 1910 (8,62 m) (Météo-France, 2018).

Les résultats de l'étude indiquent que s'il n'est pas possible de détecter un signal dans les observations, **ces épisodes seraient plus fréquents à l'avenir. Plus précisément, les simulations de plusieurs ensembles de modèles montrent une augmentation d'un facteur 1,5 à 2** environ de cette fréquence par rapport à un climat sans activités humaines ou à une période climatique de la fin du XX^{ème} siècle.

4.3 Des sécheresses des sols plus nombreuses

4.3.1 Sécheresses météorologiques

Données produites

La **sécheresse météorologique** correspond à un déficit prononcé et prolongé de précipitations. Dans la majorité des cas, cela veut dire qu'il ne pleut pas durant une longue période (eau France).

On observe une diminution du nombre de jour sans pluie (**Figure 43**) Figure 44 au XX^{ème} siècle mais une légère tendance à l'augmentation dans le futur. Le signal d'augmentation des sécheresses météorologiques reste très faible.

Figure 43 : Evolution passée et projections futures du nombre de jours sans pluie (précipitations <1 mm)

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
214j	208j	204j	217 j (212j;209j)	214j (212j;215j)	218j (217j;222j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Les sécheresses devraient augmenter très légèrement en durée (**Figure 44**). Seule la trajectoire la plus pessimiste indique une tendance forte à l'augmentation de la durée des périodes de sécheresse en fin de siècle.

Figure 44 : Evolution passée et projections futures de la période de sécheresse (maximum de jours consécutifs avec cumul de précipitations <1 mm)

1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
28,8j	24,3j	24,9j	27,2 j (26j; 24,3j)	26,2j (26j;26,6j)	26,1j (29,3j;31,5j)

Source : modélisation projet, données Météo-France (station Paris-Montsouris), CMIP6 (projections climatiques), 2020.

Si le signal relatif aux sécheresses météorologiques reste faible, il est plus marqué pour la sécheresse des sols.

4.3.2 Sécheresses des sols (agricoles)

Travaux complémentaires

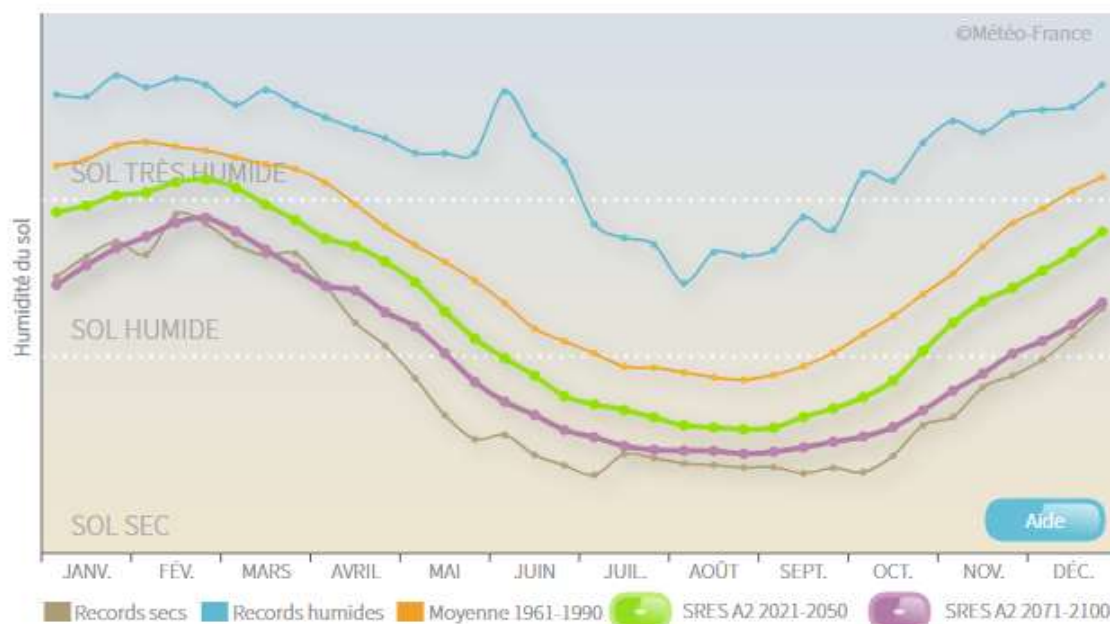
Cumulée à d'autres facteurs, l'absence de précipitations peut conduire progressivement à la **sécheresse édaphique** (ou sécheresse des sols, sécheresse agricole). D'après Météo-France, on constate une hausse des sécheresses agricoles depuis les années 1980. Les événements récents de sécheresse de 2006 et 2011 correspondent aux records de sol sec depuis 1959 respectivement pour les mois de janvier et mai.

Le signal pour les sécheresses agricoles est beaucoup plus net que pour les sécheresses météorologiques en raison de l'amplification du phénomène d'évapotranspiration du sol liée à l'accroissement des fortes chaleurs.

La tendance passée se confirme à l'avenir : on s'attend à un sol de plus en plus sec en toute saison mais particulièrement en été. **L'humidité moyenne du sol en fin de siècle pourrait correspondre aux situations sèches extrêmes d'aujourd'hui (scénario pessimiste).**

La figure de Météo-France ci-après (Figure 45) compare le cycle annuel de l'humidité du sol sur l'Ile-de-France entre la période de référence (1961-1990) et deux horizons, proche (2021-2050) et long-terme (2071-2100) selon un scénario pessimiste A2 (équivalent aux scénarios émissions hautes). Ce graphique montre un assèchement important des sols en toute saison avec un allongement de la période de sols secs de 2 à 4 mois.

Figure 45 : Cycle annuel d'humidité du sol, moyenne 1961-1990, records et simulations climatiques pour deux horizons temporels (scénario d'évolution SRES A2)



Source : Météo-France, Climat^{HD}.

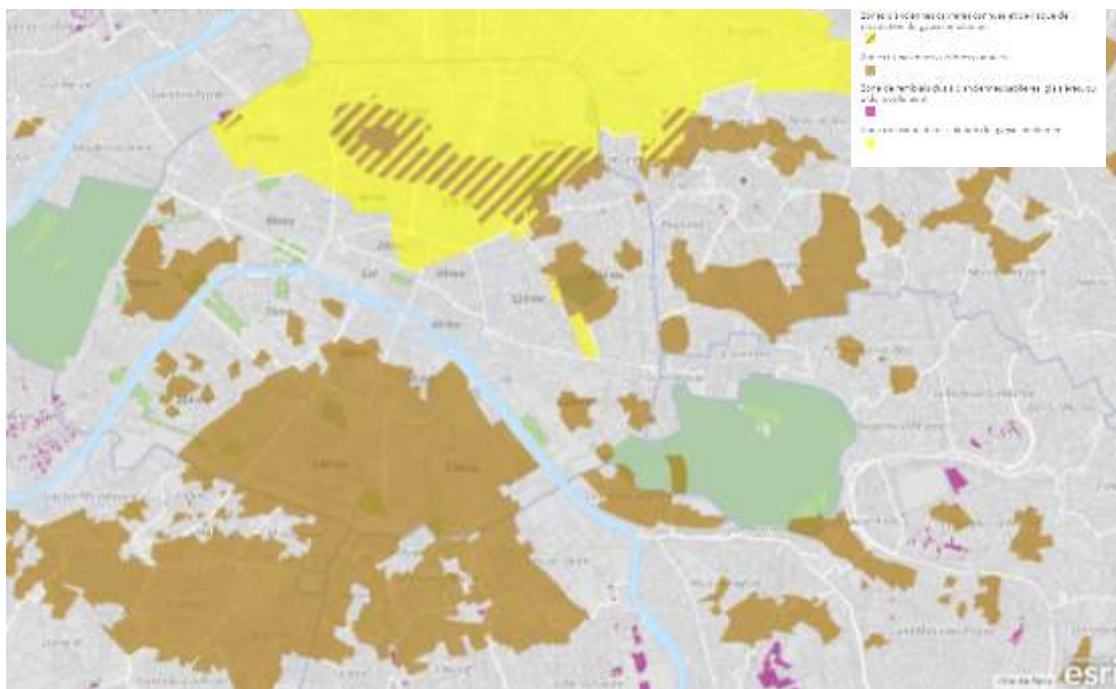
Ces résultats sont confirmés par des modélisations plus récentes (notamment CCR en 2018). Pour la région parisienne (scénario émissions hautes RCP 8.5), les projections CCR indiquent une baisse prononcée dès 2050 de l'humidité du sol en été (avec un assèchement > 10%) et en automne.

5. EVOLUTION DE L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN

5.1 Cavités souterraines (calcaire et gypse)

Le sous-sol de la Ville de Paris comporte plusieurs types de roches dont l'exploitation a donné naissance à des cavités souterraines. On trouve notamment des vides dus aux anciennes carrières de calcaire et de gypse. Par ailleurs, des vides souterrains peuvent se former par dissolution du gypse présent dans le sous-sol (zone jaune de la carte ci-après).

Figure 46 : Zonages carrières et dissolution de gypse – Paris et petite couronne



Source : <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=53ece42b40e746e3872c21bd291a9227>

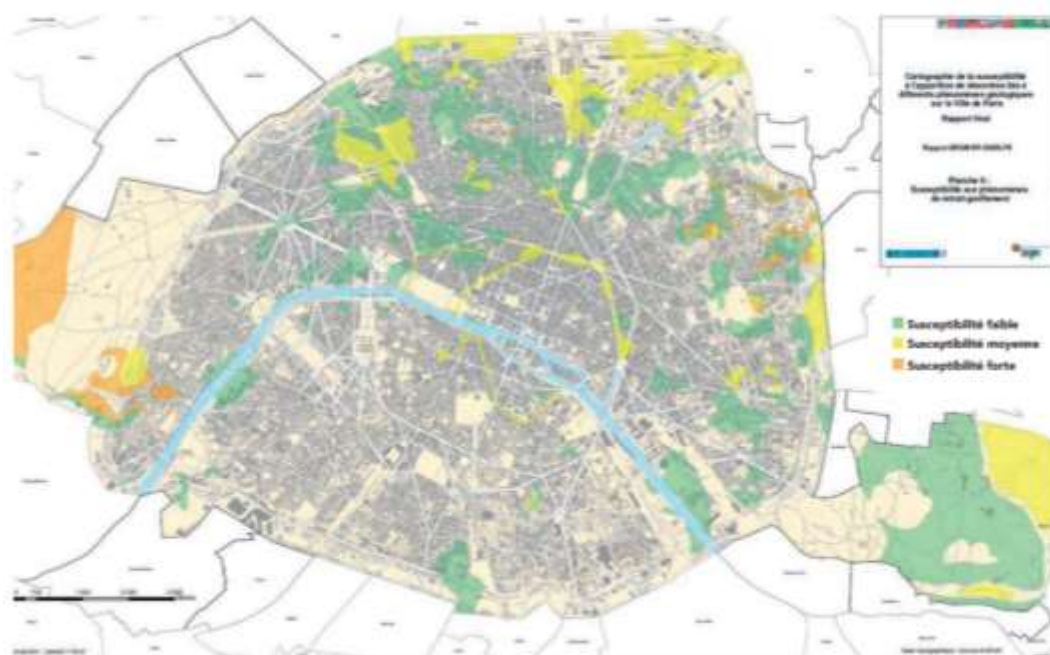
Une étude de l'INERIS menée en 2010 concernant l'impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines concluait de la manière suivante :

- L'eau, notamment par le biais des variations du régime hydrogéologique, joue un rôle essentiel sur la stabilité des cavités souterraines, aussi bien pour ce qui concerne les propriétés mécaniques des terrains (paramètres de résistance des matériaux) que la contrainte effective qui se développe au sein de ces ouvrages ;
- L'augmentation attendue du battement des nappes semble être le paramètre principal appelé à influencer sur le comportement des cavités souterraines ;
- En ce qui concerne les cavités naturelles, c'est l'évolution des cavités à cinétique de dissolution rapide (dans les roches évaporitiques type gypse) qui semble susceptible d'être plus influencée par le changement climatique (**apparition possible de nouvelles cavités au droit de terrains évaporitiques actuellement stables**)
- Concernant les cavités en milieu carbonaté (calcaire), dont la cinétique d'évolution est plus lente, il est probable que le changement climatique aura également une influence sur leur stabilité mécanique mais cette influence est difficile à quantifier à l'échelle du XXI^e siècle.

5.2 Retrait-gonflement des argiles – Sécheresse géotechnique

La Ville de Paris est soumise à d'autres risques de mouvement de terrain notamment celui de retrait-gonflement des argiles, appelé aussi sécheresse géotechnique (CCR, 2018). Cet aléa (Figure 47) est considéré aujourd'hui comme minoritaire avec seulement quelques zones de forte susceptibilité (notamment dans le bois de Boulogne).

Figure 47 : Localisation des zones de susceptibilités au retrait-gonflement des argiles à Paris



Source : Ville de Paris/BRGM.

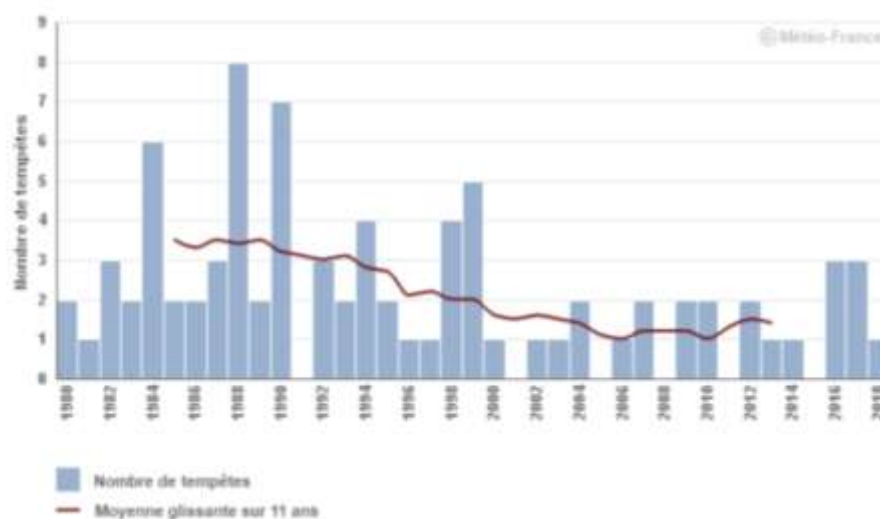
Le sol argileux présente la particularité de voir sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau. Dur et cassant lorsqu'il est asséché, il devient plastique et malléable à un certain degré d'humidité. Ces modifications de consistance peuvent s'accompagner de variations de volume : fortes augmentations de volume (phénomène de **gonflement**) lorsque la teneur en eau augmente, et inversement, rétractation (phénomène de **retrait**) en période de déficit pluviométrique marqué (d'après Ministère en charge de l'écologie).

La tendance à l'augmentation des sécheresses édaphiques devrait jouer défavorablement sur le risque de retrait-gonflement des argiles. Toutefois le sous-sol de la ville est en grande partie constitué de matériaux remaniés et artificiels, ce qui rend cet aléa pratiquement inexistant.

6. EVOLUTION DES TEMPÊTES

D'après Météo-France, le nombre de tempêtes ayant affecté la région Île-de-France est très variable d'une année sur l'autre. Sur la période 1980-2018, **on observe une tendance à la baisse significative du nombre de tempêtes** affectant la région mais sans lien établi avec le changement climatique.

Figure 48 : Nombre de tempêtes par an en région Ile-de-France depuis 1980 et moyenne glissante sur 11 ans



Source : Météo-France, Climat HD.

Les travaux de modélisation effectués dans le cadre de la présente étude ne permettent pas d'appréhender les paramètres liés aux vents violents. Selon Météo-France (ONERC, 2018), dans l'état actuel des connaissances en France, **les projections climatiques élaborées pour la France ne montrent aucune tendance significative de long-terme** sur la fréquence et l'intensité des tempêtes, que ce soit à l'horizon 2050 ou en fin de siècle.

L'ONERC (2018) souligne par ailleurs que les tempêtes hivernales génératrices de fort événements neigeux comme celle qu'a connue l'Île-de-France en 2018 avec plus de 12 cm de neige à Paris, sont des phénomènes encore peu appréhendés dans un contexte de changement climatique.

SYNTHESE ET NOTATION DES ALÉAS POUR L'INDICE 2020

Cet exercice de mise à jour des projections climatiques et des connaissances relatives aux aléas entend nourrir l'actualisation de la note « aléas » de l'indice de vulnérabilité de Paris face aux changements climatiques et à la raréfaction des ressources. Nous présentons en premier lieu une vision synthétique selon la trajectoire préférentielle retenue par la Ville à savoir la trajectoire SSP2-4.5, correspondant à des émissions moyennes, plutôt tendancielle et à un scénario mondial à +2°C. Toutefois, pour certains aléas, nous présentons aussi les résultats sous scénario plus pessimiste afin d'illustrer le panel d'incertitudes.

Une vision synthétique des évolutions passées et à venir

Données générales		- Des résultats 2012 confirmés avec des trajectoires extrêmes toutefois plus extrêmes - Forte convergence des modèles à 2030-2050, plus d'incertitude à long-terme - Des indicateurs liés à la température plus robustes que ceux liés aux précipitations - Les fortes chaleurs, amplifiées par l'îlot de chaleur, sont clairement sous-estimées. - L'aléa canicule sera incontestablement l'enjeu climatique de ce siècle pour Paris
TEMPÉRATURES	 Températures moyennes	- Un réchauffement important sur le siècle dernier - Une accélération durant les deux dernières décennies avec un dépassement symbolique des 2°C par rapport à 1885 - Une hausse qui se poursuit quels que soient les horizons et les trajectoires
	 Canicules	- Des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses ces dernières décennies (Météo-France). 2003 la canicule la plus sévère, 2019 la journée la plus chaude depuis 1947 (Météo-France) - Une augmentation future en fréquence et en intensité des vagues de chaleur 22 jours en 2050 de jours de très fortes chaleurs contre 14 aujourd'hui 20,5 nuits tropicales en 2050 contre seulement 5 aujourd'hui
	 Grands froids	- Une diminution observée de la fréquence et l'intensité des épisodes de grands froids (Météo-France) - Toutes les vagues de froid les importantes ont toutes eu lieu avant les années 2000 (Météo-France) - Des épisodes de froid futurs moins fréquents et intenses
	 Neige et verglas	- Un nombre de jours de gel divisés par 2 entre 1885 et 1985 (de 54 à 25 jours), les jours sans dégel de 10 à 2. 2002, 2000 et 1994 et 2014, années les moins gélives observées sur l'Île-de-France depuis 1959 (Météo-France) - La baisse des jours de gel se poursuit (environ 18 jours de gel par an en 2050) - Une diminution de journées sans dégel - Cette baisse devrait se poursuivre avec peu d'incertitude à l'horizon 2050 : environ 18 jours de gel par an, 2 jours sans dégel.

PLUVIOMÉTRIE		Précipitations moyennes	• Une forte variabilité mais légère augmentation du cumul sur le siècle dernier • Une tendance future légère (et entourée de fortes incertitudes) à la poursuite de cette augmentation dès 2050 • Des tendances saisonnières plus marquées (APC-Météo-France, 2015) : baisse en été et hausse du cumul hivernal en fin de siècle • Une légère baisse projetée du nombre de jours de pluie
		Fortes pluies	• Un signal à l'intensification des pluies dans les projections, principalement pour la saison hivernale (ONERC, 2018 ; Météo-France-APC, 2015) • Pas de signal pour les orages d'été (ONERC, 2018)
		Inondations	Des travaux récents indiquent un signal à l'augmentation du risque de crue : - L'étude de P. Roudier (2016) : à scénario +2°C, augmentation de l'intensité des crues de débit centennal (+20 à +40%) mais aussi décennal (+10 à +20%). - L'étude CCR-Météo-France (2018) : sous scénario extrême (RCP8.5), augmenter des cumuls de pluie sur 72h et augmentation entre 20 et 50% de la probabilité de survenance de débordement ou ruissellement associés. - Le projet Extremoscope (IPSL-Météo-France) : augmentation d'un facteur 1,5 à 2 des pluies type mai 2016 (3 jours de pluie quasi-continues) ayant occasionné une crue à 6,10m à Paris.
		Sécheresses des sols	• Une augmentation des sécheresses des sols depuis 1980. • Les événements récents de sécheresse de 2006 et 2011 correspondent aux records de sol sec depuis 1959 respectivement pour les mois de janvier et mai. • Une tendance qui se poursuit : un sol de plus en plus sec en toute saison mais particulièrement en été. L'humidité moyenne du sol en fin de siècle pourrait correspondre aux situations sèches extrêmes d'aujourd'hui.
		Mouvements de terrain	• Présence d'anciennes carrières de calcaire et de gypse à risque de dissolution. • Evolution future demeure mal cernée. Une étude de l'INERIS (2010) indique que les roches évaporitiques type gypse pourraient être influencées négativement par le changement climatique avec apparition possible de nouvelles cavités au droit de terrains actuellement stables. • Le risque de retrait-gonflement des argiles reste négligeable pour Paris en dépit d'une tendance à l'augmentation de l'aléa.
VENTS		Tempêtes	• Une baisse significative du nombre de tempêtes affectant la région entre 1980-2018 sans lien établi avec le changement climatique (Météo-France) • Aucune tendance significative de long-terme sur la fréquence et l'intensité des tempêtes, que ce soit à l'horizon 2050 ou en fin de siècle (Météo-France)

Notation de la composante « aléa » de l'indice 2020

L'ensemble de l'analyse sert donc l'actualisation de la note « aléas » de l'outil de vulnérabilité. Notons que l'ancien outil de 2012 n'intégrait que la dimension « occurrence future de l'aléa ». Nous proposons d'intégrer plusieurs dimensions et de distinguer deux notes : une note historique et une note future à 2050, pour une vision évolutive des aléas.

Les valeurs des notes d'aléas historiques et futurs restent fixes pour l'analyse des systèmes parisiens. Ces valeurs sont établies selon la grille de notation ci-dessous et appréciées à partir des projections climatiques ainsi que des éléments bibliographiques mentionnés dans le présent rapport. Ce travail reste une appréciation qualitative qui ne saurait se substituer à une analyse quantitative et statistique, hors champ de la présente étude.

Nous présentons ci-après l'échelle de valeurs des notes d'aléas historiques et 2050.

Composante aléa historique et 2050	1	Aléa très faible
	> 2	Aléa faible
	> 3	Aléa modéré
	> 4	Aléa majeur
	5	Aléa critique

Ces notes sont définies selon l'approche suivante :

Notation de l'aléa historique

On apprécie qualitativement deux composantes :

- *Intensité de l'aléa* : Intensité spatio-temporelle de l'aléa. A noter que les phénomènes chroniques (températures moyennes, précipitations) sont différenciés des phénomènes extrêmes (canicules, tempêtes etc.) dans l'appréciation. L'intensité maximale de l'aléa est aussi appréciée.
- *Evolution historique* (depuis le début des observations jusqu'à 2020) : accroissement ou réduction de la fréquence et/ou l'intensité et poids du facteur climatique dans cette évolution. Il s'agit d'apprécier l'évolution de l'occurrence passée.

La grille de notation suivante est appliquée :

	Intensité de l'aléa considéré	Evolution passée
1	Très faible	Forte réduction
> 2	Chronique ou faible	Réduction sensible
> 3	Modérée	signal faible, incertain ou stable
> 4	Forte	Augmentation modérée
5	Très forte	Augmentation forte

Les deux notes sont agrégées selon la formule suivante pour donner une note d'aléa historique :

$$Note\ aléa\ historique = \sqrt[2]{Intensité\ de\ l'aléa\ considéré * évolution\ passée}$$

Notation de l'aléa 2050

On évalue une unique dimension :

- La variation future en intensité et en fréquence de l'aléa selon la trajectoire de référence SSP2-4.5 « émissions moyennes » (scénario climat mondial à +2°C)

L'échelle de notation suivante est appliquée

	Variation future
1	Forte réduction
> 2	Réduction sensible
> 3	signal faible, incertain ou stable
> 4	Augmentation modérée
5	Augmentation forte

Pour estimer la note 2050 finale, on agrège alors la note historique à la note de variation future de l'aléa selon la formule suivante :

$$Note\ aléa\ 2050 = \sqrt[2]{Note\ aléa\ historique * variation\ future}$$

Grille d'évaluation et justification

Notations de G6+A5:I8 +A5:I8	Intensité de l'aléa considéré	N	Evolution passée	N	Note historique	Evolution 2050	N	Note future
Température moyenne	• Phénomène chronique; • Climat tempéré à dominante océanique (DDRM); • Température moyenne 2010: 13°C (Station Paris Montsouris); • Ilot de chaleur urbain amplifiant l'effet température (C3S).	2	• Hausse de la température moyenne : +2°C depuis 1885	4,5	3,0	• Signal robuste à la hausse (projections CMIP6)	4	3,5
Pluviométrie	• Phénomène chronique; • Climat tempéré à dominante océanique (DDRM); • Cumul annuel en 2010 635 mm (Station Paris Montsouris);	2	• Léger signal à la hausse des précipitations (Station Paris Montsouris)	3	2,4	• Tendance faible à la hausse des précipitations mais fortes incertitudes (projections CMIP6); • Augmentation possible de la variabilité interannuelle: Hausse en hiver et baisse en été (Météo-France, 2015)	3	2,7
Sécheresse des sols	• Aléa extrême; • Climat tempéré à dominante océanique (DDRM); • Sécheresse de référence 2003 et 2011 Nombre de jours sans pluie en 2010: 204j (Station Paris Montsouris).	3	• Augmentation des sécheresses des sols depuis 1990 (Météo-France, Climat HD)	4	3,5	• Un sol de plus en plus sec en toute saison mais particulièrement en été (Climat HD, Météo-France)	5	4,2

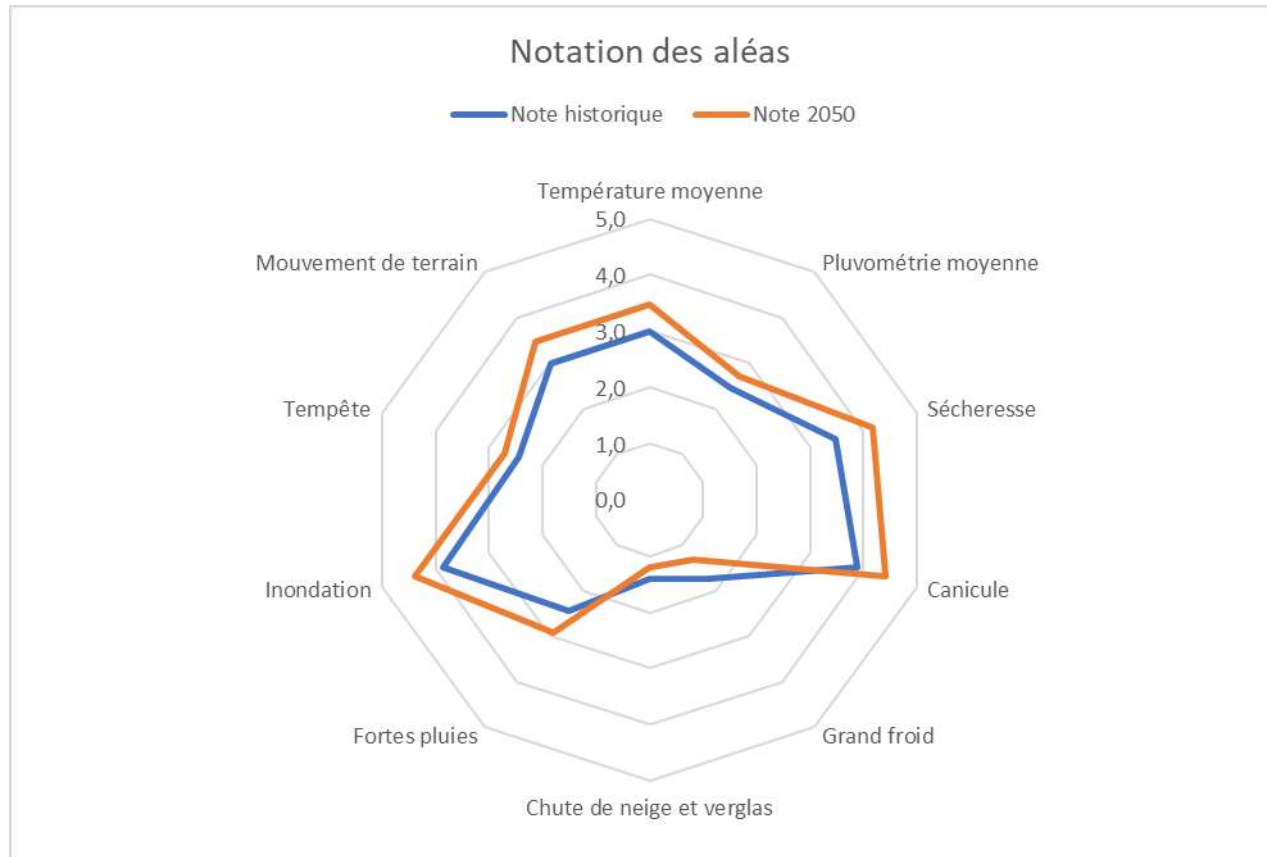
Notations des aléas	Intensité de l'aléa considéré	N	Evolution passée	N	Note historique	Evolution 2050	N	Note future
Canicule	- Aléa extrême; - Climat tempéré à dominante océanique (DDRM); - Effet intensifié par l'Ilot de chaleur urbaine (C3S); - Canicule de référence : 2003; - Nb de jours très chauds en 2010 : 13,6 (Station Paris Montsouris).	3	- Tous les indicateurs à la hausse dont doublement des journées les plus chaudes. (Station Paris Montsouris) - Vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses (Météo-France, Climat HD).	5	3,9	- Nombre de jours de très fortes chaleurs atteindrait 22 jours en 2050 (projections CMIP6); - Les nuits tropicales, peu nombreuses au siècle dernier, vont devenir plus fréquentes pour atteindre 20,5 nuits à l'horizon 2050 (projections CMIP6).	5	4,4
Grand froid	- Aléa extrême; - Climat tempéré à dominante océanique (DDRM); - Température minimale du jour le plus froid en 2010 : -4,9°C (Station Paris Montsouris).	3	- Forte baisse des indicateurs liés au grand froid; - Vagues de froid les importantes avant les années 2000 (Météo-France, Climat HD).	1	1,7	Si on ne peut exclure des épisodes futurs, ils se produiront moins fréquemment et probablement de façon moins intense (Météo-France, 2015).	1	1,3
Neige et verglas	- Aléa extrême; - Zone au climat tempéré à dominante océanique (DDRM); - Nombre de jours sans dégel en 2010: 2,2 (Station Paris Montsouris).	2	Diminution du nombre de jours de gel, division par 2 entre 1885 et 1985 (de 54 à 25 jours) (Station Paris Montsouris).	1	1,4	Baisse devrait se poursuivre avec peu d'incertitude à l'horizon 2050 : environ 18 jours de gel par an (projections CMIP6).	1	1,2

Notations des aléas	Intensité de l'aléa considéré	N	Evolution passée	N	Note historique	Evolution 2050	N	Note future
Fortes pluies	- Aléa extrême; - Zone au climat tempéré à dominante océanique (DDRM). - Orages d'été et pluies intenses hivernales	2	Pas d'évaluation à disposition du signal passé sur la région parisienne.	3	2,4	- Absence de signal, notamment pour les épisodes orageux estivaux (ONERC, 2018); - Signal à l'intensification des pluies pour la période hivernale (Projections CMIP6, ONERC 2018, Météo-France, CCR 2018)	3,5	2,9
Inondations	Aléa extrême; zone au climat tempéré à dominante océanique (DDRM). Crue centennale de référence (1910) Territoire à Risque important d'inondation (TRI)	5	Pas d'évaluation disponible sur le signal passé relatif à une crue centennale Pas de signal dans les observations pour un événement de type mai 2016	3	3,9	- Ensemble des travaux de modélisation récent semble indiquer un signal robuste à l'augmentation du risque de crue pour Paris - Sous scénario +2°C, augmentation du débit plus marquée sur le signal centennal (+20 à +40%) que sur le signal décennal (+10 à +20%). (Roudier, 2015) - augmentation d'un facteur 1,5 à 2 environ de fréquence événement type mai 2016 (projet EXTREMOSCOPE)	5	4,4
Tempêtes	- Aléa extrême; - Zone au climat tempéré à dominante océanique (DDRM).; - Tempête de référence: 1999.	3	Tendance à la baisse significative du nombre de tempêtes affectant la région mais sans lien établi avec le changement climatique (Météo-France).	2	2,4	Pas de signal futur (Météo-France).	3	2,7

Notations des aléas	Intensité de l'aléa considéré	N	Evolution passée	N	Note historique	Evolution 2050	N	Note future
Mouvement de terrain	• Aléa extrême; • Aléa faible Retrait Gonflement des Argiles (RGA) ; • Aléa cavités; souterraines gypse et calcaire sur une grande partie de Paris (en particulier Nord pour la dissolution)	3	Pas d'évaluation disponible sur le signal passé	3	3,0	• D'après une étude de l'INERIS (2010), c'est l'évolution des cavités à cinétique de dissolution rapide (dans les roches évaporitiques type gypse) qui semble susceptible d'être plus influencée par le changement climatique (apparition possible de nouvelles cavités au droit de terrains évaporitiques actuellement stables); • La tendance à l'augmentation des sécheresses édaphiques devrait jouer défavorablement sur le risque RGA.	4	3,5

Résultats

La notation permet de dégager une vision des aléas prioritaires pour la Ville de Paris. Les canicules, les inondations par crue et les sécheresses des sols arrivent en premier lieu. Certains aléas ayant déjà sensiblement diminué au cours du siècle passé continueront de décroître sur le territoire parisien : aléa neige, verglas et grand froid. D'autres sont moins bien appréhendés, notamment celui relatif à l'évolution des mouvements de terrain ou bien encore celui des pluies intenses estivales.



BIBLIOGRAPHIE ET DONNÉES

Caisse Centrale de Réassurance, 2018 : Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles.

Agence Parisienne du Climat, Météo-France, 2015 : le changement climatique à Paris, évolution du climat à Paris depuis 1900, quel climat futur ?

Météo-France, 2018 : Paris face au changement climatique, dossier de presse, juin 2018.

ONERC, 2018 : Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique, rapport au Premier ministre et au Parlement.

Préfecture de Paris, 2018 : Dossier départemental risques majeurs.

Philippe Roudier, Jafet C. M. Andersson, Chantal Donnelly, Luc Feyen, Wouter Greuell, et al.. 2016: Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. Climatic Change, Springer Verlag, 135 (2), pp.341-355. ff10.1007/s10584-015-1570-4ff. fffhal-01235952f

Vautard et al., 2016 : Projet EXTREMOSCOPE, Interprétation et attribution des événements météorologiques et climatiques extrêmes dans un cadre climatique en France, rapport final.

Jouzel J. (dir), Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard R., 2014 : Le climat de la France au XXI^e siècle. Volume 4. Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer, Rapports Direction générale de l'énergie et du climat, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

DGEC, ONERC, 2013 : Découvrir les nouveaux RCP et SSP utilisés par le GIEC, synthèse.

Ville de Paris, 2012 : Diagnostic de vulnérabilités et de robustesses de Paris face aux changements climatiques à la raréfaction des ressources.

ADEME, 2012 : Diagnostic de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique. Eléments méthodologiques tirés de l'expérience internationale.

INERIS, 2010 : Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines : Etat des connaissances.

Hawking E, Sutton R, 2009: The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions.

Données climatiques :

- CMIP6 : Available at: <https://pcmdi.llnl.gov/CMIP6/> [Last accessed August 2020].
- CMIP6, France, IPSL, Accès aux données des modèles français : <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/> [Last accessed August 2020].
- Météo-France, Séries d'observation à la station Paris Montsouris depuis 1885.

Données cartographiques

- Copernicus Climate Change Service, CLimate data store, intensité de l'îlot de chaleur urbain : <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home> [Last accessed August 2020].
- Zonages carrières et dissolution de gypse – Paris et petite couronne
<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=53ece42b40e746e3872c21bd291a9227>
- Localisation des zones de susceptibilités au retrait-gonflement des argiles à Paris : [Ville de Paris/BRGM \(dans diagnostic de vulnérabilités et de robustesses de Paris face aux changements climatiques et à la raréfaction des ressources, 2012.](#)

- Plan de prévention du risque d'inondation de Paris Zonage réglementaire (2007), © IGN-BDOrtho - APUR 2012 - UTEA75 http://cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=cartorisques_075&service=DRIEA_IF

Sites web :

- Météo-France, Climat HD : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd>
- Météo-France, tempêtes : <http://tempestes.meteo.fr/spip.php?article197>
- Paris.fr
<https://cdn.paris.fr/paris/2020/06/19/9197549f3bc54585b3a33783bdb475c0.pdf>

ANNEXE 1

TABLEAU DE BORD DES INDICATEURS CLIMATIQUES

Aléas	Indicateurs	1885 (1871-1900)	1985 (1971-2000)	2010 (2001-2019)	2030 (2015-2045)	2050 (2035-2065)	2085 (2071-2100)
Températures	Températures moyennes quotidiennes (°C/an)	10,7°C	12°C	13°C	13,2°C (13,3°C;13,4°C)	13,4°C (13,4°C;14,1°C)	14,5°C (13,6°C;16,6°C)
	Température maximales quotidiennes (°C/an)	15°C	15,5°C	16,6°C	16,8°C (16,6°C;16,8°C)	16,9°C (17°C;17,5°C)	17,8°C (17,2°C;20,1°C)
Canicules	Nombre de journées estivales avec température ≥ 25 °C (jours/an)	39j	41,4j	54,8j	60,2j (59,1j ;59,3j)	62,3j (64,8j ; 72,8j)	73,2j (68j ;98j)
	Nombre de jours très chauds avec température ≥ 30 °C (jours/an)	7,2j	8,2j	13,6j	19,7 j (19j;21,4j)	21,8j (26,7j;29,6j)	34,1j (26,2j;57,9j)
	Nombre de nuits tropicales (jours/an)	0,2j	3,5j	5j	17,8j (14,9j;18,8j)	20,5j (22,6j;30j)	34,8j (24,3j;69,1j)
	Température maximale du jour le plus chaud (°C/an)	33°C	33°C	36°C	35°C (34,7°C;35°C)	36°C (35.5°C;36.5°C)	37°C (35.6°C;41°C)
	Température minimale quotidienne (°C/an)	6,4°C	8,6°C	9,3°C	9,6°C (9,5°C;9,8°C)	9,8°C (9,8°C;10,4°C)	10,6°C (10°C;12,7°C)
Grands froids	Température minimale du jour le plus froid (°C/an)	-10,1°C	-6,3°C	-4,9°C	-5,4°C (-5,8°C;-3,4°C)	-5°C (-5,1°C;-3,6°C)	-3,3°C (-3,1°C;-1°C)

Neige et Verglas	Nombre de jours de gel (température minimale $\leq 0^{\circ}\text{C}$) (j/an)	54,6j	24,3j	19,3j	13,3 j (19,7j;16,3j)	17,8j (18,8j;14,1j)	14,1j (15,3j;6,2j)
	Nombre de jours sans dégel (température maximale $\leq 0^{\circ}\text{C}$) (j/an)	9,8j	4j	2,2j	2,7 j (3,2j; 1,4j)	2,2j (2,3j;1,1j)	1j (3j ;0j)
Précipitations	Cumul pluviométrique annuel (mm/an)	551 mm	640 mm	635 mm	633mm (667-674)	679mm (658;678)	721mm (645-742)
	Nombre de jours de pluie (cumul de précipitations ≥ 1 mm) (j/an)	104j	111j	109j	105j (108j;110j)	108j (108j;108j)	105j (106j;105j)
Inondation	Cumul de précipitations maximales sur 5 jours consécutifs (mm/an)	49 mm	60 mm	63 mm	64mm (68 ;61)	64 mm (62 ;66)	69 mm (66 ;80)
	Nombre maximum de jours de pluies consécutifs (maximum de jours consécutifs avec cumul de précipitations ≥ 1 mm (j/an)	7,2j	7,4j	6,8j	6,8j (6,7j ;7,5j)	7j (6,3j ;7,5j)	7,4j (7,2j ;7,6j)
Sécheresse météorologique	Nombre de jours sans pluie (précipitations < 1 mm)	214j	208j	204j	217 j (212j;209j)	214j (212j;215j)	218j (217j;222j)
	Période de sécheresse (maximum de jours consécutifs avec cumul de précipitations < 1 mm)	28,8j	24,3j	24,9j	27,2 j (26j; 24,3j)	26,2j (26j;26,6j)	26,1j (29,3j;31,5j)

ANNEXE 2
GRILLE DE NOTATION DES ALÉAS