

Rapport

Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, volet infrastructures et systèmes de transport, action 1

Impacts potentiels du changement climatique sur les
infrastructures et systèmes de transport, sur leurs
référentiels de conception, entretien et exploitation, et
besoins de précisions des projections climatiques

Juillet 2015

Rédaction / relecture principale

Cerema / DTecEMF

Claire GALIANA
Aldéric HAUCHECORNE
Guirec PRÉVOT
Jean-Jacques TRICHET

Cerema / DTecITM

Anne-Laure BADIN / **pilotage**
Sophie CARIOU
Marie COLIN / **pilotage**
Christian CREMONA
Xavier DELACHE
Marc DI MARTINO / **pilotage**
Linda FERREZ
Fabien PALHOL
Pascal ROSSIGNY
Yannick TARDIVEL
Jean-Marc TARRIEU

Cerema / DTecTV

Marine LERICOLAIS

Cerema / DTerCE

Caroline MAUDUIT

Cerema / DTerNP

Véronique BERCHE

DGITM

Olivier GAVAUD
André LEUXE

IFRECOR

Michel PORCHER

RFF

Anne-Laure GENTY

SNCF

Alexandre KADDOURI
Antoine ROTHEY

STAC :

Catherine BONARI
Aubin LOPEZ
David SMAGGHE

STRMTG

Laurent ROQUES

VNF

Christine BOURBON

Remerciements aux nombreux experts du Cerema, de la SNCF, du STAC, du STRMTG et de VNF qui ont contribué à la relecture de ce rapport, au listing et à l'analyse des référentiels.

Sommaire

Avant-propos.....	7
Introduction.....	9
Chapitre.....	11
Évolutions climatiques attendues en France à l’horizon 2100.....	11
1 - Méthodologie.....	13
1.1 - Les scénarios d’émission.....	13
1.2 - Les modèles de simulation du climat.....	15
1.3 - Les indices climatiques proposés.....	16
1.4 - Moyennes spatiales et calcul des incertitudes.....	18
2 - Tendances issues des simulations climatiques.....	21
2.1 - Évolution des températures.....	21
2.2 - Évolution des précipitations.....	22
2.3 - Évolution du niveau des eaux souterraines.....	24
2.4 - Évolution du vent.....	25
2.5 - Évolution du niveau des mers (submersion marine) et modification du climat de houle.....	26
2.6 - Événements météorologiques extrêmes.....	28
2.7 - Évolution de la biodiversité.....	31
2.8 - Particularité de l’Outre-Mer.....	33
3 - Synthèse des tendances climatiques.....	36
Chapitre.....	40
Impacts potentiels des évolutions climatiques attendues sur les infrastructures de transport.....	40
4 - Impacts des évolutions de la température.....	42
4.1 - Sur les infrastructures routières.....	42
4.2 - Sur les ouvrages en terre.....	42
4.3 - Sur les ouvrages d’art.....	43
4.4 - Dans le domaine ferré.....	45
4.5 - Dans le domaine fluvial.....	49
4.6 - Sur les infrastructures portuaires et maritimes.....	49
4.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires.....	49
4.8 - Sur les installations de transport par câbles.....	50
5 - Impacts des évolutions des précipitations.....	51
5.1 - Sur les infrastructures routières.....	51
5.2 - Sur les ouvrages en terre.....	51
5.3 - Sur les ouvrages d’art.....	52
5.4 - Dans le domaine ferré.....	54
5.5 - Dans le domaine fluvial.....	56
5.6 - Sur les infrastructures portuaires et maritimes.....	57
5.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires.....	57
5.8 - Sur les installations de transport par câbles.....	58
6 - Impacts des évolutions du vent.....	59
6.1 - Sur les infrastructures routières.....	59
6.2 - Sur les ouvrages en terre.....	59
6.3 - Sur les ouvrages d’art.....	59
6.4 - Dans le domaine ferré.....	60
6.5 - Dans le domaine fluvial.....	62
6.6 - Sur les infrastructures portuaires et maritimes.....	62
6.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires.....	63
6.8 - Sur les installations de transport par câble.....	63
7 - Impacts d’une évolution du niveau des mers et modification du climat de houle.....	64
7.1 - Sur les infrastructures routières.....	64
7.2 - Sur les ouvrages en terre.....	64
7.3 - Sur les ouvrages d’art.....	64

7.4 - Dans le domaine ferré.....	65
7.5 - Dans le domaine fluvial.....	65
7.6 - Sur les infrastructures portuaires et maritimes.....	65
7.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires.....	66
8 - Impacts d'une évolution de la biodiversité.....	67
8.1 - Sur les infrastructures routières.....	67
8.2 - Sur les ouvrages en terre.....	67
8.3 - Sur les ouvrages d'art.....	67
8.4 - Dans le domaine ferré.....	67
8.5 - Dans le domaine fluvial.....	67
8.6 - Sur les infrastructures portuaires.....	67
8.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires.....	68
9 - Tableau de synthèse des impacts potentiels des évolutions climatiques par type d'infrastructure.....	70
Chapitre.....	75
Documentation technique de conception, exploitation et entretien des infrastructures de transport potentiellement impactée par le changement climatique.....	75
10 - Méthodologie d'analyse des référentiels techniques.....	77
10.1 - Méthodologie générale pour l'ensemble des domaines de transport.....	77
10.2 - Référentiels identifiés.....	77
Chapitre.....	78
Projections climatiques nécessaires pour l'adaptation des référentiels.....	78
11 - Précisions sur la manière d'aborder le sujet.....	80
11.1 - Précision spatiale ou temporelle ?.....	80
11.2 - Quelles variables sont concernées par ces demandes de précisions ?.....	80
11.3 - Évolution des paramètres météorologiques ou des indicateurs calculés à partir de ces paramètres ?80	
12 - Précisions pour le domaine routier.....	81
12.1 - Liste des variables concernées.....	81
12.2 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels routiers	85
13 - Précisions pour les ouvrages d'art routiers.....	87
13.1 - Pour la température.....	87
13.2 - Pour les précipitations.....	87
13.3 - Pour le vent.....	87
13.4 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels d'ouvrages d'art.....	88
14 - Précisions pour le domaine ferroviaire.....	90
14.1 - Pour la température.....	90
14.2 - Pour les précipitations.....	90
14.3 - Pour le vent.....	90
14.4 - Globalement.....	90
14.5 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels ferroviaires.....	91
15 - Précisions pour le domaine fluvial et maritime.....	94
15.1 - Les variables basées sur des études statistiques (notion de période de retour).....	94
15.2 - Des variables utilisées comme donnée d'entrée.....	95
15.3 - En résumé.....	95
15.4 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels du domaine maritime et fluvial.....	96
16 - Précisions pour le domaine aéroportuaire.....	97
16.1 - Typologie de climat.....	97
16.2 - Température de référence d'aérodrome.....	98
16.3 - Vent.....	98
16.4 - Précipitations.....	99
16.5 - En résumé.....	99
16.6 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels aéroportuaires.....	100
17 - Précisions pour le domaine spécifique aux remontées mécaniques et transports guidés.....	102

17.1 - Principales variables concernées.....	102
17.2 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels du domaine spécifique aux remontées mécaniques et transports guidés.....	103
18 - Acronymes.....	109
19 - Bibliographie.....	112
19.1 - Bibliographie du rapport.....	112
19.2 - Documents généraux.....	115
Annexes.....	116
1 - Méthodologie de calcul des tendances climatiques et de définition des niveaux de confiance.....	116
2 - Méthodologies détaillées d'analyse des référentiels techniques.....	117
2.1 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels routiers (DTecITM).....	117
2.2 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels spécifiques aux ouvrages urbains	119
2.3 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels liés aux ouvrages d'art routiers..	120
2.4 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels spécifiques aux tunnels. .	120
2.5 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels ferroviaires.....	120
2.6 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels maritimes et fluviaux.....	121
2.7 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels aéroportuaires.....	121
2.8 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels spécifiques aux transports guidés	122
3 - Synthèse des méthodologies et de la répartition de l'analyse des référentiels.....	123
4 - Liste des référentiels.....	125
4.1 - Catégories de documents.....	125
4.2 - Référentiels routiers.....	126
4.3 - Référentiels de voiries urbaines.....	137
4.4 - Référentiels ouvrages d'art routiers.....	139
4.5 - Référentiels ferroviaires.....	141
4.6 - Référentiels maritimes et fluviaux.....	150
4.7 - Référentiels aéroportuaires.....	154
4.8 - Référentiels spécifiques aux remontées mécaniques et transports guidés.....	155

Page laissée blanche intentionnellement

Avant-propos

La lutte contre le changement climatique est une priorité nationale. La Conférence internationale sur le climat de 2015 « COP 21 », qui se tiendra à Paris, aura pour objectif de parvenir à un accord international permettant de contenir le réchauffement global en deçà de 2°C.

Malgré les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre déployés, des changements climatiques portant sur les températures, mais aussi le cycle global de l'eau, le recul des neiges et des glaces, l'élévation du niveau moyen mondial des mers et la modification de certains extrêmes climatiques, vont affecter de nombreux secteurs : agriculture, forêt, tourisme, pêche, biodiversité, aménagement du territoire, bâtiments, infrastructures de transport...

En sus des efforts d'atténuation, il convient de se préparer à ce changement, sans quoi il risque d'induire des coûts et des dommages bien supérieurs à l'effort d'anticipation. Il s'agit en particulier dès aujourd'hui de réduire notre vulnérabilité aux variations climatiques afin d'éviter de forts dommages environnementaux, matériels, financiers mais aussi humains.

Complément indispensable aux actions d'atténuation déjà engagées, l'adaptation au changement climatique est devenue un enjeu majeur qui appelle une mobilisation nationale. La France s'est dotée d'un plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) en 2011.

Les impacts du changement climatique sur les réseaux de transports concernent tous les modes. L'adaptation est rendue indispensable par la longue durée d'utilisation des réseaux et matériels de transport. Différentes mesures ont été identifiées dans le PNACC. Elles permettent d'analyser l'impact du changement climatique, de prévenir les vulnérabilités des systèmes de transport et de préparer l'amélioration de la résistance et de la résilience des infrastructures, existantes et futures, pour assurer la continuité et la sécurité des services de transport des personnes et des biens.

Le présent rapport correspond à l'action 1 du volet « infrastructures et systèmes de transport » du PNACC. Il a pour objectif d'examiner les impacts potentiels du changement climatique sur les référentiels de conception, d'entretien et d'exploitation des infrastructures et systèmes de transport. Il permettra ensuite d'engager les révisions éventuellement nécessaires de ces référentiels techniques.

Il s'agit ainsi de s'assurer que les infrastructures et matériels de transport construits pour une période longue (certains jusqu'à un siècle ou davantage), permettent de répondre de façon satisfaisante aux évolutions attendues sous l'effet des conditions moyennes et extrêmes du changement climatique.

Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer

Mai 2015

Page laissée blanche intentionnellement

Introduction

Le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique – PNACC [1] – est le résultat d'une construction collective partagée¹. Il a été rendu public le 20 juillet 2011, est d'application immédiate et d'une durée de 5 ans. Il se décline dans l'ensemble des politiques publiques : santé, urbanisme, eau, biodiversité, recherche, transport, etc.

Les impacts du changement climatique sur les réseaux de transport, quel que soit le mode considéré, pourraient augmenter au cours du siècle à venir. L'importance du bon fonctionnement de ces réseaux pour la société et l'économie ainsi que leur très longue durée d'utilisation rend nécessaire leur adaptation.

Pour cela, différentes actions ont été identifiées et décrites dans la fiche infrastructures et systèmes de transport du PNACC. Elles permettront d'analyser l'impact du changement climatique, de prévenir les vulnérabilités des systèmes de transport et de préparer l'amélioration de la résistance et de la résilience des infrastructures, existantes ou futures, pour assurer la continuité et la sécurité du transport des personnes et des biens. Ces actions sont les suivantes :

- action 1 : passer en revue et adapter les référentiels techniques pour la construction, l'entretien et l'exploitation des réseaux de transport (infrastructures et matériels liés au service) en métropole et en Outre-Mer ;
- action 2 : étudier l'impact du changement climatique sur la demande de transport et les conséquences sur la réorientation de l'offre de transport ;
- action 3 : définir une méthodologie harmonisée pour réaliser les diagnostics de vulnérabilité des infrastructures et des systèmes de transport terrestre, maritime et aéroportuaire ;
- action 4 : établir un état de la vulnérabilité des réseaux de transport terrestre, maritime et aéroportuaire en métropole et Outre-Mer et préparer des stratégies de réponse adaptées et progressives aux problématiques du changement climatique, globales et territoriales.

À la demande de la Direction Générale des Infrastructures de Transports et de la Mer (DGITM) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE), un groupe de travail a été constitué en novembre 2011, pour mettre en œuvre ces différentes actions. Il a rassemblé les représentants des services techniques et gestionnaires d'infrastructures suivants : Cerema (au travers de ses différentes directions techniques et territoriales), CETU, STAC, STRMTG, et des représentants d'IFRECOR, de RFF, de la SNCF et de VNF.

Il s'est régulièrement réuni pour produire, entre autres, ce rapport, dont la finalité est de répondre à l'action 1 de la fiche infrastructures et systèmes de transport du PNACC. Plus précisément, cette action a pour objectif :

- d'identifier l'ensemble des référentiels techniques (guides, etc.), des normes et des textes de loi (circulaires, etc.) utiles à la conception, l'entretien et l'exploitation des infrastructures de transport et susceptibles d'être impactés par le changement climatique, car ils s'appuient sur des variables climatiques ;
- d'identifier les projections climatiques nécessaires pour adapter les référentiels précédemment identifiés ;
- d'adapter ces référentiels.

Le groupe de travail s'est ainsi attaché à :

¹Le rapport interministériel « évaluation du coût des impacts du changement climatique » a été publié en deux étapes : une première phase en 2008 [2] et une seconde phase en 2009 [3]. En 2010 ont été menées différentes concertations (nationale en mode Grenelle, régionale, citoyenne) puis une table ronde finale.

- rappeler les principales évolutions climatiques attendues à l’horizon 2100 sur la base des rapports de 2011 [4] et 2012 [5, 6] de l’expertise dirigée par Jean Jouzel² et des éléments scientifiques du quatrième rapport d’évaluation du GIEC (Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat), publié en 2007 [7]. Dans le cadre de ce rapport ont été prises en compte uniquement les évolutions climatiques graduelles ;
- lister les impacts actuels du climat et ceux potentiels du changement climatique, sur le patrimoine des infrastructures existant. Les infrastructures traitées sont les suivantes : infrastructures routières, ouvrages en terre, ouvrages d’art routiers, infrastructures ferroviaires, fluviales, maritimes et portuaires, aéroportuaires, remontées mécaniques et transports guidés ;
- lister les référentiels techniques (guides, normes, textes officiels, etc.) pouvant être impactés par le changement climatique, car ils utilisent ou mentionnent des variables climatiques. Ces référentiels ont ensuite été classés par priorité d’adaptation ;
- déterminer les variables climatiques dont les projections sont nécessaires pour l’adaptation des référentiels techniques.

L’ensemble de cette démarche a abouti a un rapport :

- homogène, car il a été alimenté par chaque contributeur dans sa thématique avec une méthodologie commune ;
- hétérogène, dans la mesure où les descriptions des impacts climatiques actuels et futurs, le listing des référentiels techniques et des demandes de projections climatiques ont fait l’objet d’un travail spécifique par type d’infrastructures.

Chaque rédacteur est responsable de la partie liée aux infrastructures qu’il a traitées.

²Jean Jouzel est un climatologue et glaciologue français, actuellement vice-président du groupe de travail 1 de l’IPCC.

Chapitre

Évolutions climatiques attendues en France à l'horizon 2100

Dans le cadre des travaux préparatoires au PNACC et pour le PNACC lui-même, une mission d'expertise a été confiée à Jean Jouzel. Cette mission a pour objectif d'établir des simulations du changement climatique à l'échelle française. Dans le présent rapport, la définition de « changement climatique » est celle utilisée dans le rapport spécial du GIEC sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique [8] :

« un changement dans l'état du climat qui peut être identifié (p.e. à l'aide de tests statistiques) par des changements dans la moyenne et / ou dans la variabilité de ses propriétés, persistant sur une longue durée, typiquement des décennies ou plus. Le changement climatique peut avoir pour origine des processus naturels internes, des forçages ou des modifications humaines persistantes dans la composition de l'atmosphère ou l'utilisation des territoires. »

La mission d'expertise a abouti à la publication de rapports présentant des simulations climatiques régionalisées aux horizons 2020-2050 et 2070-2100 comparativement à une période de référence (1980-1999 ou 1970-1999). Ces résultats s'appuient, entre autres, sur des rapports du GIEC, notamment le quatrième rapport d'évaluation [7].

Le chapitre ci-dessous propose une interprétation des données présentées dans les rapports de 2011 et 2012 [5, 6] de l'expertise dirigée par Jean Jouzel et de façon plus générale, dans le quatrième rapport d'évaluation du GIEC [7]. Ces données constituent, sur proposition de la DGEC, les hypothèses d'évolutions du climat français à partir desquelles le groupe a travaillé³.

Dans un premier temps les hypothèses et limites du travail de l'expertise dirigée par Jean Jouzel (scénarios, échelle) sont rappelées. Dans un deuxième temps sont présentés les indices climatiques proposés et enfin, les tendances d'évolution climatiques attendues.

³Les nouvelles hypothèses d'évolution climatiques présentées dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC [9] n'ont pas été prises en compte dans le présent rapport, mais ses principales différences avec le quatrième rapport d'évaluation [7] sont néanmoins expliquées. En effet, les travaux relatifs à l'action 1 du volet infrastructures et systèmes de transport du PNACC ont débuté en 2011, antérieurement à la publication du cinquième rapport d'évaluation du GIEC en 2013.

1 - Méthodologie

Un ensemble de scénarios de référence (chapitre 1.1) proposé par le GIEC décrit l'évolution possible des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre (GES). Ces scénarios servent d'entrées à des modèles de simulation du climat (chapitre 1.2) et permettent d'obtenir des projections de différents paramètres climatiques (chapitre 1.3), avec toutefois des incertitudes (chapitre 1.4).

1.1 - Les scénarios d'émission

Les scénarios du GIEC, qui décrivent des évolutions possibles des émissions et concentrations en GES, s'appuient sur diverses hypothèses du développement économique futur et de ses conséquences sur l'environnement. Ils prennent en compte l'évolution de la population, l'économie, le développement industriel et agricole, et de façon assez simplifiée la chimie atmosphérique. Ces scénarios – appelés SRES⁴ – sont décrits ci-dessous.

Le **scénario A1** est associé à une croissance économique rapide, une population mondiale atteignant un maximum au milieu du siècle avant de décliner, et au développement de nouvelles technologies plus efficaces. Il est aussi caractérisé par une convergence entre régions, en particulier du revenu par habitant. Dans le cas du scénario A1B, l'évolution technologique respecte un équilibre entre les sources d'énergie.

Le **scénario A2** est associé à un monde très hétérogène avec un développement économique essentiellement régional, un accroissement continu de la population et une évolution technologique plus lente que pour les autres scénarios.

Le **scénario B1** décrit un monde convergent avec une population mondiale culminant au milieu du siècle comme pour le scénario A1. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité.

Le **scénario B2** décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2 et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les scénarios B1 et A1.

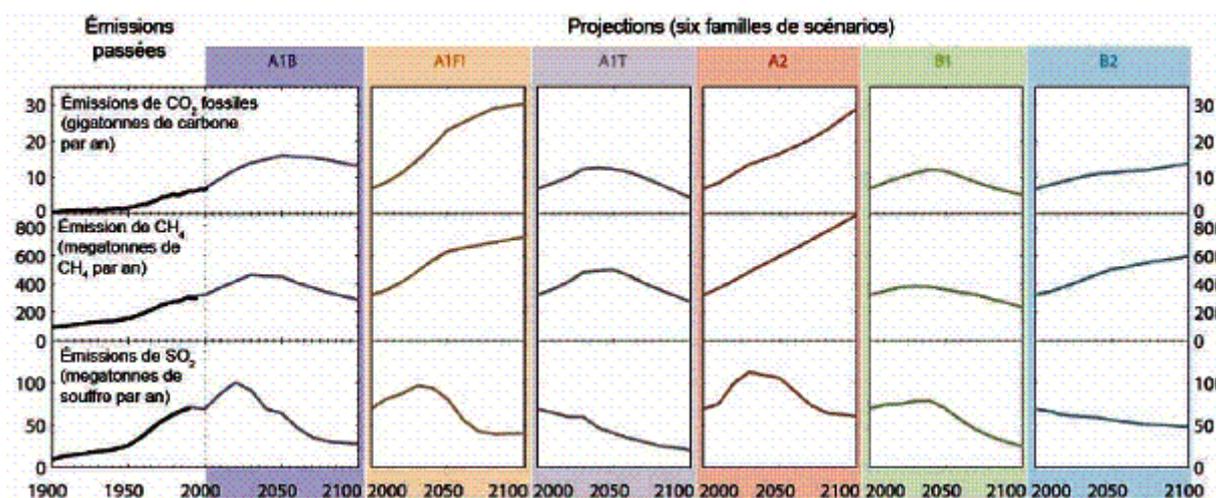


Figure 1 : Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (CO₂ et CH₄) et d'un précurseur d'aérosols (SO₂). Tout à gauche de la figure, on voit les émissions produites entre 1900 et 2000. Ensuite, six familles de scénarios sont présentées. Tous ces scénarios sont équiprobables. Source : GIEC, 2007 [7].

⁴Special Report on Emissions Scenarios (SRES) est le rapport publié en 2000 [10] qui présente ces scénarios.

En octobre 2013, le GIEC a publié le 1^{er} volume de son cinquième rapport d'évaluation du changement climatique [9], proposant ainsi de nouvelles hypothèses d'évolution du climat. Ce cinquième rapport se base sur de nouveaux scénarios de référence de l'évolution du forçage radiatif⁵ sur la période 2006-2300, appelés profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre, d'ozone et de précurseurs des aérosols ou Representative Concentration Pathways (RCP). Les RCP, exprimés en concentration en GES, sont utilisés par les climatologues comme entrées pour les modèles climatiques. En parallèle, sociologues et économistes élaborent des scénarios socio-économiques (SSP) aboutissant à des projections des émissions de gaz à effet de serre, en cohérence avec les RCP. Cette démarche permet de prendre en compte les rétroactions possibles entre conditions socio-économiques et politiques climatiques, évolution des concentrations en GES et évolutions climatiques. Quatre RCP ont été retenus dans le rapport du GIEC :

Nom	Forçage radiatif (Wm ⁻²)	Concentration de GES (ppm eq-CO ₂)	Trajectoire
RCP 8.5	> 8,5 en 2100	> 1370 en 2100	Croissante
RCP 6.0	~ 6 au niveau de stabilisation après 2100	~ 850 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	~ 4,5 au niveau de stabilisation après 2100	~ 660 au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à ~ 3 avant 2100 puis déclin	Pic ~ 490 avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP. Source : Moss R.H., et al., 2010 [11].

Ils peuvent être rapprochés des scénarios SRES utilisés dans les rapports précédents du GIEC, de la manière suivante :

- RCP 8.5, scénario pessimiste, est un peu plus fort que le scénario A2 ;
- RCP 6.0 est proche du scénario A1B ;
- RCP 4.5 est proche du scénario B1 ;
- le RCP 2.6 n'a pas d'équivalent avec les anciens scénarios SRES. Il intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C.

Les modèles climatiques associés à ces RCP ont été affinés depuis le quatrième rapport d'évaluation du GIEC : ils intègrent de façon plus complète les mécanismes qui régissent le climat et ont une résolution plus fine. De plus, un nombre de modèles plus important a été utilisé dans le cinquième rapport du GIEC [9] : une cinquantaine de modèles a été utilisée dans le cinquième rapport d'évaluation, au lieu de 23 pour le quatrième rapport d'évaluation.

En ce qui concerne les SSP, cinq ont été retenus dans ce cinquième rapport :

- 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** ;

⁵« Le forçage radiatif mesure l'impact de certains facteurs affectant le climat sur l'équilibre énergétique du système couplé Terre/atmosphère. [...] Le forçage radiatif est généralement quantifié comme « le taux de transfert d'énergie par unité surfacique du globe, mesuré dans les hautes couches de l'atmosphère », et il est exprimé en « watts par mètre carré » GIEC, 2007 [7].

- 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.

Une synthèse plus détaillée des nouveaux scénarios RCP et SSP a été rédigée et publiée en 2013 par l'ONERC [12].

Les tendances d'évolutions climatiques dégagées dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC [9] sont généralement semblables à celles annoncées dans le quatrième rapport d'évaluation, aussi bien au niveau de leurs structures que des amplitudes, en prenant en compte les différences de scénarios. Avant toute comparaison détaillée des projections données dans ces deux rapports, il convient toutefois de bien vérifier les périodes de référence, qui peuvent minorer ou majorer les évolutions climatiques.

1.2 - Les modèles de simulation du climat

Les modèles climatiques sont des outils mathématiques très complexes, capables de reconstituer l'évolution des éléments qui composent le système climatique. Le principe des modèles climatiques repose sur la représentation mathématique, par un ensemble d'équations, des phénomènes physiques qui gouvernent l'évolution de l'atmosphère et de l'océan. Ces équations sont mises en place sur une grille de calcul qui recouvre, avec un maillage aussi fin que possible, la surface du globe, mais aussi l'épaisseur de l'atmosphère et la profondeur de l'océan. La résolution de ces équations aux différents points du maillage (ou grille) et la confrontation de ces résultats à ceux observés permettent d'améliorer le schéma numérique et le paramétrage mis en œuvre.

À l'échelle mondiale, pour produire ses rapports et les scénarios climatiques qui les accompagnent, le GIEC utilise 23 modèles de type AOGCM (les plus complexes). À l'échelle de la France, les évolutions climatiques sont simulées à partir des modèles climatiques régionaux français, par exemple comme ARPEGE-Climat et LMDZ, respectivement développés par le CNRM-Météo-France (Centre national de recherches météorologiques) et l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) :

- le modèle ARPEGE-Climat utilisé à Météo-France est dérivé du modèle de prévision opérationnelle à courte échéance ;
- le modèle LMDz est aussi un modèle de circulation générale à maille variable ;
- le modèle ALADIN-Climat utilisé à Météo-France est dérivé du modèle de prévision opérationnelle à courte échéance ALADIN ;
- le modèle MAR est quant à lui, comme ALADIN-Climat, un modèle couvrant un domaine à aire limitée ;
- enfin, le projet ANR SCAMPEI⁶ [13] apporte une réponse plus précise à la question du changement climatique dans les régions de montagne de la France Métropolitaine. Il s'appuie en partie sur des modèles de simulation issus de l'expertise dirigée par Jean Jouzel. Les phénomènes extrêmes, l'enneigement et les incertitudes y sont modélisés avec une maille plus fine (8 km) pour tenir compte au mieux de la complexité topographique.

⁶<<http://www.cnrm.meteo.fr/scampe/>>

La synthèse des résultats issus de ces modèles est présentée au sein de deux rapports dont l’expertise a été dirigée par Jean Jouzel (tableau 2). Suivant les scénarios retenus par le PNACC, le rapport de janvier 2011 estime le scénario A2 comme étant plutôt pessimiste et le scénario B2 comme étant plutôt optimiste. Compte tenu des incertitudes liées à l’exercice de modélisation climatique et aux scénarios à retenir, le rapport de février 2012 a intégré, outre des simulations des scénarios d’émission B1 et A2, des simulations basées sur le scénario de concentration en GES et en aérosols A1B. Ce second rapport est basé sur trois modèles climatiques à descente d’échelle régionale⁷. Les résultats sont donnés pour trois périodes de 30 ans : 1961-1990 en période de référence, 2021-2050 pour un futur proche et 2071-2100 pour la fin du siècle.

	Rapport 2011	Rapport 2012
Modèles et résolutions	ARPEGE Climat (60 km) LMDz (160 km)	ALADIN-Climat (12 km) LMDz (20 km) MAR (20 km)
Scénarios	A2, B2	A1B, A2, B1
Corrections	Quantile / quantile par saison	Quantile / quantile par saison et type de temps
Périodes	ARPEGE Climat, référence : 1980-1999 2020-2039 2040-2059 2080-2099 LMDz, référence : 1970-1999 2030-2059 2070-2099	Pour les 3 modèles, référence : 1961-1990 2021-2050 2071-2100

Tableau 2 : Tableau synthétisant les modèles utilisés, les scénarios d’évolution du climat et les périodes simulées. Source : Cerema.

Enfin, de nombreuses données de projections climatiques sont disponibles dans la base de données DRIAS⁸ (Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l’Impact et l’Adaptation de nos Sociétés et environnements).

1.3 - Les indices climatiques proposés

Les indices climatiques définis dans les rapports de l’expertise dirigée par Jean Jouzel sont présentés un par un, ci-après. Dix indices ont été définis pour la température, cinq pour les précipitations, un pour l’humidité du sol et un pour les vents extrêmes. Certains indices sont définis par leur fréquence, d’autres par leur intensité moyenne ou extrême⁹.

La description des indices est extraite des rapports de l’expertise dirigée par Jean Jouzel [4, 5, 6].

⁷La descente d’échelle ici citée est appelée descente d’échelle dynamique : il s’agit d’obtenir des projections climatiques à l’échelle régionale. Une explication plus détaillée peut être trouvée dans le rapport de 2011 issu de l’expertise dirigée par Jean Jouzel [4].

⁸<<http://www.drias-climat.fr/>>

⁹La notion d’événement climatique extrême correspond dans ce rapport à la définition proposée par le GIEC [8] : « extrême climatique (événement météo ou climatique extrême) : fait qu’une variable météorologique ou climatique prend une valeur située au-dessus (ou au-dessous) d’un seuil proche de la limite supérieure (ou inférieure) de la plage de valeurs observées pour cette variable.

1.3.1 - Les indices de température

T01 : température moyenne quotidienne : la température moyenne quotidienne se calcule en chaque point de grille, et pour chaque jour, comme la moyenne de la température minimale et de la température maximale simulée durant le jour considéré.

T02 : température minimale quotidienne : la température minimale quotidienne (TMIN) représente la température la plus basse simulée en chaque point de grille durant le jour considéré.

T03 : température maximale quotidienne : la température maximale quotidienne (TMAX) représente la température la plus élevée simulée en chaque point de grille durant le jour considéré.

T04 : valeurs extrêmes de la température maximale quotidienne : afin de caractériser les valeurs extrêmes de la température maximale quotidienne, on utilise le 90^e centile de TMAX : par exemple, pour les valeurs annuelles, on classe pour chaque année les 365 (ou 366) valeurs quotidiennes de TMAX dans l'ordre croissant, le 90^e centile représentant la valeur au-dessus de laquelle se trouve les 10 % de valeurs les plus élevées (soit la 328^e valeur).

T05 : nombre de jours de TMAX anormalement élevée : cet indice permet de quantifier l'occurrence de périodes anormalement chaudes (en comparaison de la climatologie) en comptant le nombre de jours pour lesquels la température maximale quotidienne dépasse de plus de 5 °C une valeur climatologique de référence. Pour obtenir cette valeur de référence pour chaque jour de l'année, on calcule le cycle annuel moyen de la température maximale quotidienne pour la période de référence, en effectuant une moyenne glissante sur cinq jours de ce cycle annuel.

T06 : nombre de jours de TMIN anormalement élevée : cet indice est calculé de façon similaire à l'indice T05, en considérant cette fois le nombre de jours pour lesquels la température minimale quotidienne dépasse de plus de 5 °C la valeur climatologique de référence.

T07 : nombre de jours de vagues de chaleur : une vague de chaleur est définie comme une période anormalement chaude durant plus de cinq jours consécutifs. Comme pour l'indice T05, on détermine les jours pour lesquels la température maximale quotidienne dépasse de plus de 5 °C une valeur climatologique de référence, mais en ne comptant que les jours appartenant à une série de plus de cinq jours chauds consécutifs.

T08 : nombre de jours de TMIN anormalement basse : cet indice permet de quantifier l'occurrence de périodes anormalement froides (en comparaison de la climatologie) en comptant le nombre de jours pour lesquels la température minimale quotidienne est inférieure de plus de 5 °C à une valeur de référence. Pour obtenir cette valeur de référence pour chaque jour de l'année, on calcule le cycle annuel moyen de la température minimale quotidienne pour la période de référence, en effectuant une moyenne glissante sur cinq jours de ce cycle annuel.

T09 : nombre de jours à températures négatives : un jour est considéré comme jour à températures négatives lorsque sa température maximale est inférieure à 0 °C.

T10 : nombre de jours de gel : un jour est considéré comme jour de gel lorsque sa température minimale est inférieure à 0 °C.

1.3.2 - Les indices de précipitations

Les indices de précipitation se calculent à partir des précipitations quotidiennes simulées, représentant pour chaque jour le cumul de la pluie et de la neige. L'unité des précipitations est en kg/m²/jour en sortie des modèles, mais en considérant une densité constante des précipitations égale à celle de l'eau liquide, cette unité est équivalente à des mm/jour (1 kg d'eau liquide représente une hauteur d'eau de 1 mm répartie sur une surface de 1 m²).

P01 : précipitations quotidiennes moyennes : cet indice donne les précipitations moyennes quotidiennes en mm/jour.

P02 : valeurs extrêmes des précipitations quotidiennes : pour caractériser la réponse des précipitations extrêmes au changement climatique, on utilise la fraction des précipitations au-dessus du 90^e centile. En calculant le cumul des précipitations des jours où ce seuil est dépassé, et en divisant

le tout par le cumul sur toute l'année, on obtient une fraction nous donnant la part des événements de fortes précipitations sur le total des précipitations annuelles. Cet indice compris entre 0 et 1 n'a pas d'unité. On peut toutefois le multiplier par 100 pour exprimer les résultats en pourcentages.

P03 : nombre de jours de précipitations intenses : cet indice donne le nombre de jours pour lesquels les précipitations quotidiennes dépassent le seuil de 20 mm. Ce seuil, largement supérieur pour la plupart des points de grille à la moyenne des précipitations des jours pluvieux, permet d'isoler les événements de précipitations intenses.

P04 : périodes de fortes sécheresses : la définition d'une sécheresse est assez complexe, car elle dépend du domaine considéré et du point de vue dans lequel on se place. On peut en effet distinguer quatre grands types de sécheresses : météorologique, hydrologique, agricole ou encore socio-économique. Un événement sec peut être considéré comme une forte sécheresse dans un de ces domaines sans forcément l'être pour les autres (exemple : pour un agriculteur, un déficit de précipitations à une certaine période de l'année peut-être néfaste sans pour autant que le sol soit suffisamment sec pour correspondre à une sécheresse du point de vue hydrologique). L'indice calculé ici, permettant de caractériser l'intensité des sécheresses du point de vue météorologique, est le nombre maximum de jours secs consécutifs. Un jour est considéré sec si les précipitations quotidiennes lui correspondant n'ont pas excédé 1 mm.

P05 : nombre de jours de chutes de neige : la détermination la plus correcte du nombre de jours de chutes de neige consisterait à analyser les données de précipitations neigeuses fournies en sorties des modèles. Cependant, les réanalyses atmosphériques SAFRAN (système d'analyse à mésoéchelle de variables atmosphériques près de la surface) ne fournissent pas ce paramètre, ce qui ne nous permet pas d'appliquer la méthode de correction au climat de référence. Une autre manière de procéder consiste à déduire ce paramètre à partir des données de température et de précipitations corrigées. Un jour est alors considéré comme un jour de chutes de neige lorsque sa température minimale quotidienne est inférieure à 0 °C et que ses précipitations quotidiennes sont non nulles. Il faut noter que cette méthode tend à sur-estimer la valeur réelle de l'indice durant la journée, le passage sous les 0 °C et les précipitations n'intervenant pas forcément simultanément.

1.3.3 - L'indice d'humidité du sol

H01 : afin d'évaluer l'intensité des sécheresses du point de vue hydrologique, le minimum annuel du contenu en eau total du sol est donné, c'est-à-dire intégré sur toute la profondeur de sol. Ces données ne sont pas disponibles pour le modèle LMDz donc seuls les résultats obtenus avec ARPEGE-Climat sont montrés.

1.3.4 - L'indice de vent

V01 : afin de caractériser les changements d'intensité des vents les plus violents, nous donnons les valeurs du vent maximal annuel. Cet indice est exprimé en km/h.

1.4 - Moyennes spatiales et calcul des incertitudes

Les indices présentés dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel sont calculés à partir des séries quotidiennes simulées par ALADIN-Climat, LMDz, et MAR. Ces indices ont pour la plupart été définis dans le cadre du projet européen STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions).

Les valeurs de chacun des indices sont calculées en chaque point de grille (chapitre 1.2). À partir de ces valeurs, des moyennes spatiales peuvent être calculées, soit au niveau du territoire français dans sa globalité, soit en effectuant un découpage régional en ne prenant en compte que les points de grille appartenant à la région d'intérêt. On peut calculer une valeur de l'indice pour une année donnée, une saison donnée, etc. Il est ensuite possible de calculer la moyenne de ces valeurs pour la période de chaque scénario climatique considéré. Par exemple, dans le rapport 2012, pour le scénario A2, les périodes durent trente ans : 1961-1990, etc.

Les résultats sont donnés pour la France métropolitaine dans son ensemble, mais également selon un découpage régional en cinq grands domaines¹⁰ définis sur la figure 3.

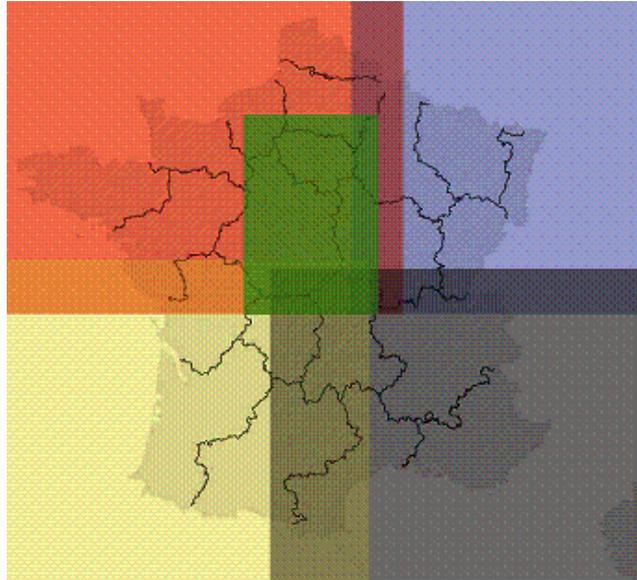


Figure 2 : Découpage de la France en 5 grands domaines.
Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

Ce découpage a été choisi afin de pouvoir attribuer chacune des régions administratives à un des cinq grands domaines.

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux, qui donnent la valeur de l'indice pour la période de référence (ligne 1961-1990), ainsi que les écarts à cette période de référence pour chacune des périodes et des scénarios correspondants (figure 3). L'intervalle d'incertitude pour l'écart moyen à la valeur de référence correspond à un niveau de confiance de 95 %.

Cet intervalle permet d'estimer l'incertitude liée à la variabilité naturelle du climat, mais ne prend en compte ni l'incertitude liée au scénario d'émission utilisé, ni celle liée aux limites des modèles climatiques. Afin de présenter l'éventail des possibles dû à ces incertitudes, les résultats sont montrés indépendamment pour chacun des scénarios et des modèles.

Les valeurs entre parenthèses donnent une indication sur les extrêmes simulés par les modèles. Elles correspondent aux valeurs minimales et maximales obtenues sur la période considérée parmi l'échantillon de trente années.

La figure 3 donne un exemple.

¹⁰Les coordonnées précises de chaque zone sont disponibles dans le rapport de 2011 de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [4].

Modèle		ALADIN	LMDZ	MAR	
Domaine		FRANCE			
Période de référence	1961-1990	10.3	10.2	10.3	
Période de projection	2021-2050	B1	1.1/1.6 (0.6/2.1)	1.5/2.1 (0.7/3.0)	1.5/2.0 (0.4/2.6)
		A1B	1.2/1.8 (0.7/2.5)		
		A2	0.9/1.5 (-0.3/2.5)		
Scénario	2071-2100	B1	1.7/2.3 (1.1/3.2)		
		A1B	2.7/3.4 (2.0/4.2)	3.6/4.1 (2.8/4.6)	2.2/2.7 (1.8/3.0)
		A2	3.6/4.3 (2.6/5.0)		

↑

Ecart entre la valeur moyenne de l'indice sur 2071-2100 et la valeur de référence (intervalle d'incertitude correspondant à un niveau de confiance de 95%)

↑

Ecart min/max sur la période considérée

Figure 3 : Tableau de lecture des indicateurs et de leur évolution selon les modèles et les scénarios. Dans cet exemple, l'indice (en l'occurrence la température moyenne quotidienne) vaut 10,3 °C en moyenne sur la période de référence d'ALADIN-Climat et de MAR. Cet indice vaut 10,2°C pour LMDz. Source : Peings Y., et al., 2012 [5].

Dans le cas du scénario A2, sa valeur moyenne sur la période 2071-2100 est susceptible d'augmenter d'une quantité comprise entre 3,6 et 4,3 °C (avec un niveau de confiance de 95 %) pour le modèle ALADIN-Climat. Cependant, sur cette période, il est possible qu'une année soit plus chaude de 2,6 °C par rapport à la référence, l'année la plus chaude s'écartant quant à elle de 5,0 °C de cette référence.

2 - Tendances issues des simulations climatiques

Toutes les projections climatiques présentées ci-dessous sont issues des rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [4, 5, 6], d'une note de synthèse rédigée par l'ONERC [14], ainsi que du PNACC.

2.1 - Évolution des températures

2.1.1 - Description

De manière générale, la tendance d'évolution des températures moyennes sera à la hausse sur tout le territoire métropolitain (figure 4), ainsi que dans les DOM-COM. Concernant les résultats les plus marquants selon le scénario B2, la **température moyenne quotidienne (indice T01) en France métropolitaine augmenterait d'environ 2 à 2,5 °C** entre la fin du XX^e siècle et la fin du XXI^e siècle. L'augmentation est d'environ 2,5 à 3,5 °C pour le scénario A2. Le réchauffement est semblable pour les deux scénarios à l'horizon 2030 et à l'horizon 2050, se situant sensiblement entre 0,5 et 1,5 °C. Il est toutefois légèrement supérieur pour le scénario A2 en 2050. La faible différence entre les scénarios à ces horizons traduit l'inertie de la réponse du système climatique aux émissions de gaz à effet de serre. Elle souligne aussi l'importance à ces échéances de l'impact de la variabilité climatique naturelle qui masque pour partie la tendance lente au réchauffement d'origine anthropique. Après 2050, les écarts entre le scénario « optimiste » B2 et celui « pessimiste » A2 se creusent nettement.

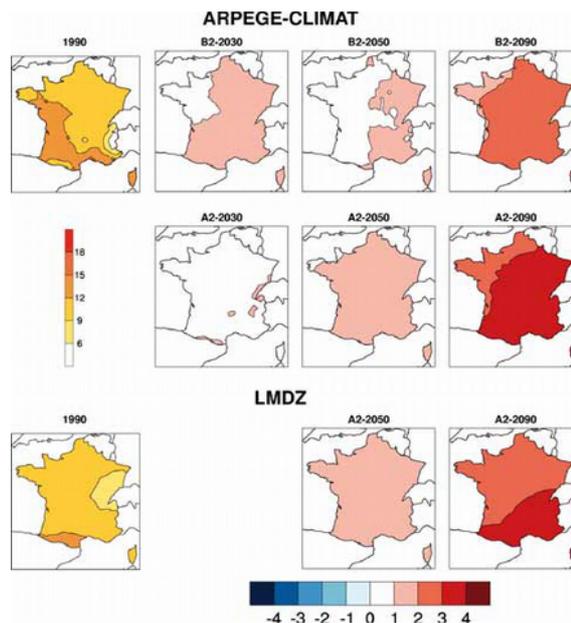


Figure 4 : Indice T01. Température moyenne quotidienne en moyenne annuelle pour la période de référence et écarts entre les scénarios et la référence. Unité : °C. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

2.1.2 - Tendances climatiques significatives

- la température moyenne sur le territoire tend à augmenter ;
- une valeur significative maximale de 3,5 °C (scénario « pessimiste » : A2) sera retenue pour l'augmentation de la température moyenne sur un siècle ;
- il y aura de moins en moins de jours de gel ;
- il semble également que les amplitudes thermiques quotidiennes évoluent.

2.2 - Évolution des précipitations

2.2.1 - Description

Si l'évolution des précipitations moyennes quotidiennes (indice P01) est relativement incertaine pour l'hiver et l'automne (figures 7 et 8), les résultats des simulations selon les deux scénarios montrent une tendance à la diminution des précipitations au printemps et en été (figures 5 et 6). Cette diminution, sensible seulement à la fin du siècle pour le scénario B2, est plus précoce et de plus forte amplitude avec le scénario A2 (autour de 10 % vers 2050 et de 30 % vers 2090 pour la saison estivale). Quel que soit le scénario, le Sud-Ouest de la France serait la région la plus touchée par cette diminution.

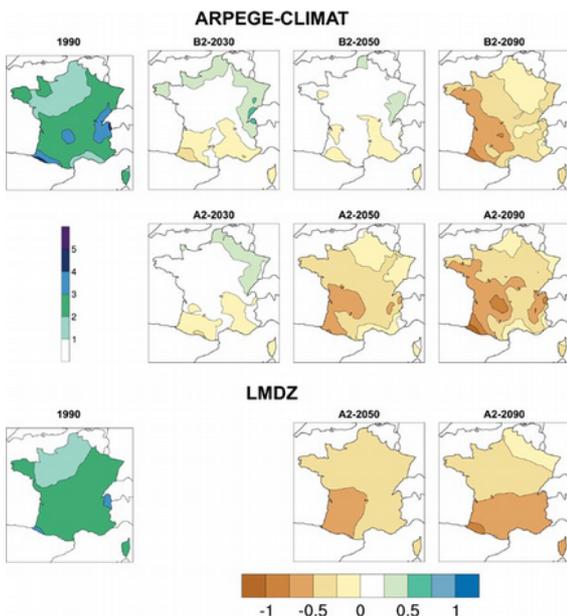


Figure 6 : Indice P01. Précipitations quotidiennes moyennes au printemps. Unité : mm/jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

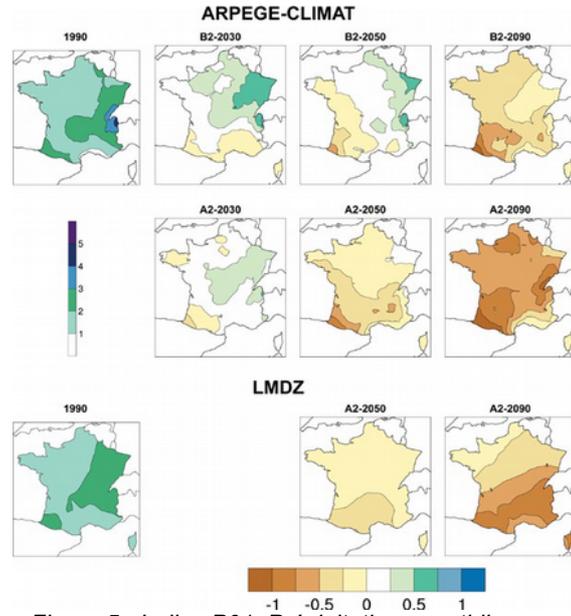


Figure 5 : Indice P01. Précipitations quotidiennes moyennes en été. Unité : mm/jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

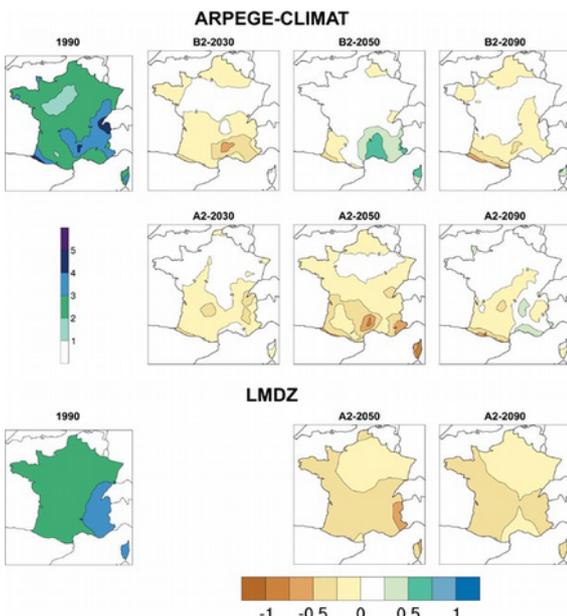


Figure 8 : Indice P01. Précipitations quotidiennes moyennes en automne. Unité : mm/jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

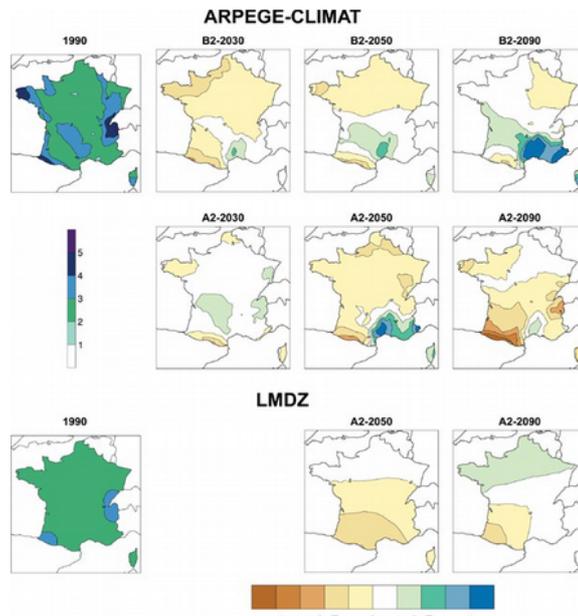


Figure 7 : Indice P01. Précipitations quotidiennes moyennes en hiver. Unité : mm/jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

La baisse des précipitations associées aux températures plus élevées fait apparaître des périodes de sécheresses plus importantes. La tendance à **l'augmentation de la durée des sécheresses estivales** (indice P04) est marquée dans toutes les régions (figure 9). Il ne faut pas attendre les années 2050 ou 2100 pour observer ce phénomène : pour le mois d'avril 2011, Météo France fait le constat qu'avec une température moyenne supérieure de 4°C à la moyenne de référence, avril 2011 se positionne au deuxième rang du mois d'avril le plus chaud depuis 1900, derrière avril 2007 (+4.3 °C) et largement devant 1945 (+2.8 °C). Pour la pluviométrie, on se situerait parmi les mois d'avril les plus secs depuis 1959.

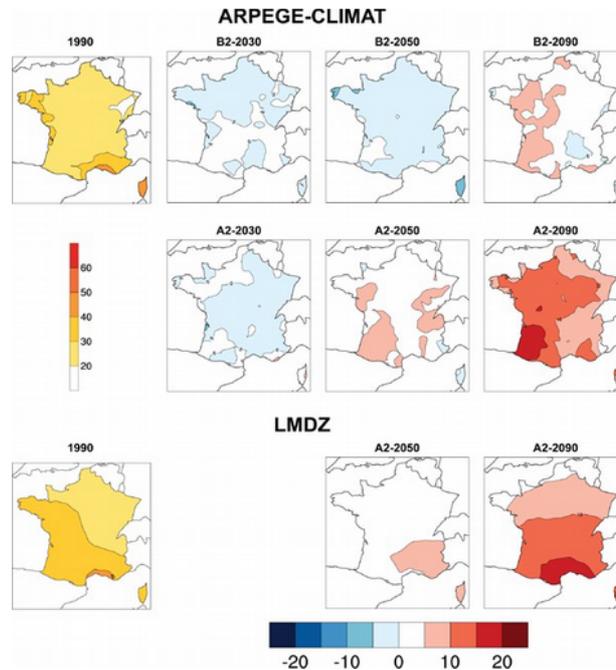


Figure 9 : Indice P04. Nombre de jours annuels (à gauche) et estivaux (à droite) de sécheresse et écarts entre les scénarios et la référence. Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

Par ailleurs, le contenu minimum en eau du sol (indice H01) diminue progressivement dans le modèle du CNRM (pas de données pour celui de l'IPSL), suggérant une tendance à l'assèchement des sols au cours du siècle sur une grande partie de la France, hormis durant la saison hivernale (figure 10).

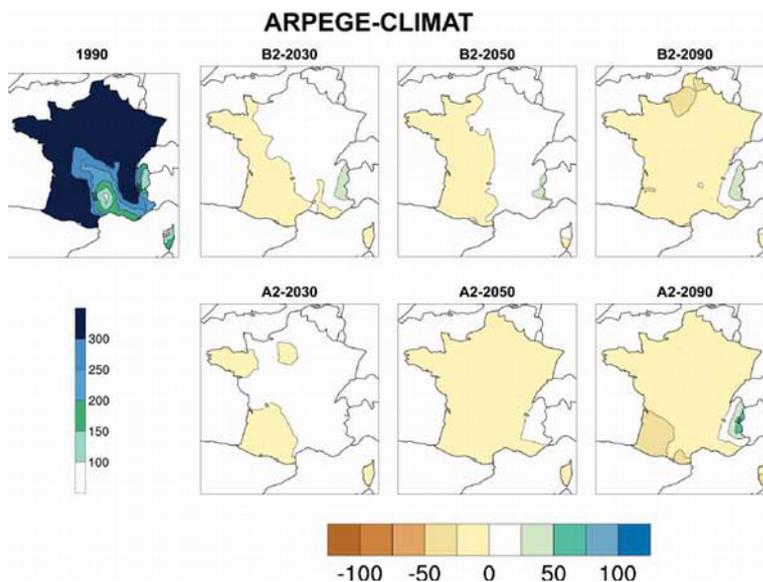


Figure 10 : Indice H01. Minimum annuel du contenu en eau du sol, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Unité : kg/m². Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

Un des signaux les plus importants concerne les **précipitations neigeuses** (indice P05) : elles **diminuent de façon très marquée** au cours du siècle dans les deux modèles, et ce dès 2030. En effet, le nombre de jours de chutes de neige devrait diminuer au fil des ans voir disparaître à partir de 2050 sur le territoire (figure 11).

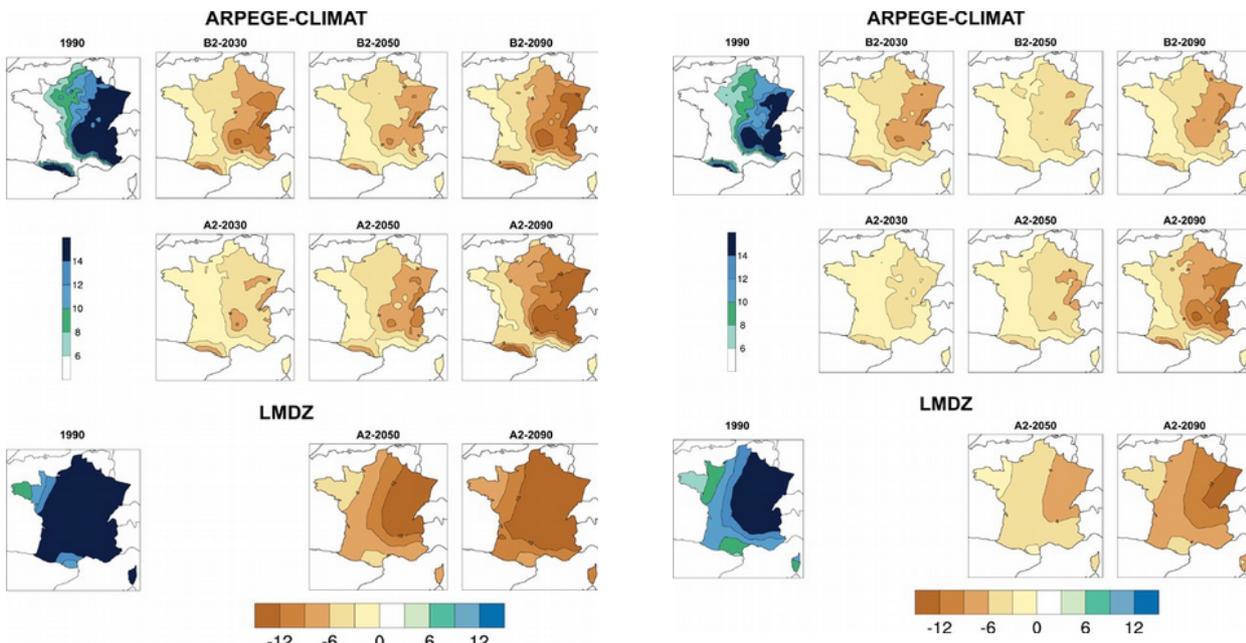


Figure 11 : Indice P05. Nombre de jours de chutes de neige annuels (à gauche) et en hiver (en hiver). Unité : jour.
Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

2.2.2 - Tendances climatiques significatives retenues

- les précipitations tendraient à diminuer au printemps et en été. Aucune tendance significative n'a été repérée pour l'automne et l'hiver ;
- on observe une diminution du nombre de jours de neige, cela de manière marquée ;
- le nombre de jours de sécheresse serait plus fréquent et cette évolution est liée à la diminution probable du nombre de jours de pluie.

2.3 - Évolution du niveau des eaux souterraines

Les différents scénarios d'évolution climatique pour le XXI^e siècle prévoient globalement, pour la France, une augmentation de l'intensité des précipitations hivernales et une baisse des précipitations estivales.

De ce fait, d'après le rapport de 2011 de l'expertise dirigée par Jean Jouzel, les eaux superficielles seront affectées, avec une augmentation possible des débits en hiver (dans les Alpes et le sud-est de la France) et des étiages plus sévères en été, essentiellement dus à une baisse globale des précipitations efficaces. Cependant, il existe des disparités entre bassins versants dues à leur morphologie (plaine, montagne), le type climatique auquel ils sont soumis (océanique, continental, méditerranéen) et leur relations avec les nappes d'eau souterraine (nappes alluviales, nappe de la craie, etc.) susceptibles de lisser l'impact des étiages.

Ce changement climatique devrait également affecter, avec un certain retard, les eaux souterraines. Parmi ces dernières, il se traduira différemment selon leur étendue (donc leur inertie), leur rapport avec la surface (nappes libres ou captives) et le type de roche-réservoir qui les héberge (milieu poreux à circulation lente, milieu karstique ou fissuré à circulation rapide).

Globalement, à ce jour, la majorité des modèles prévoit une baisse piézométrique moyenne annuelle, mais l'inconnue réside dans les fluctuations saisonnières, notamment en période hivernale.

À l'échelle de l'année, le déficit dû à la diminution de la recharge lors des étiages estivaux pourra être plus ou moins compensé par l'augmentation des précipitations hivernales : il en résultera donc principalement une augmentation de l'ampleur du battement annuel des nappes.

L'impact attendu du changement climatique sur les eaux souterraines devrait donc avoir à la fois un aspect quantitatif et un aspect qualitatif :

- sur le plan quantitatif, il s'agira de causes naturelles (modification climatique) aggravées par certains comportements anthropiques (augmentation des prélèvements d'eau de nappe) ;
- sur le plan qualitatif, on pourrait assister à une augmentation de l'agressivité de l'eau¹¹ avec, de ce fait, un impact plus fort dans les roches réservoirs sensibles aux phénomènes de dissolution comme les terrains carbonatés (calcaire, craie) ou évaporitiques (gypse, sel).

2.3.1 - Tendances climatiques significatives retenues

- Les eaux superficielles devraient avoir un débit augmenté en hiver et subir des étiages plus sévères en été. Ces tendances sont susceptibles de varier selon les bassins versants.
- Le niveau piézométrique moyen annuel des eaux souterraines tendrait à diminuer, les fluctuations saisonnières sont encore mal connues. Ces variations devraient être disparates.

2.4 - Évolution du vent

2.4.1 - Description

Les études et modélisations du changement climatique concernant le régime des vents sont **très incertaines**, il existe peu de données sur le sujet. Si la modélisation climatique s'est grandement améliorée, il n'en reste pas moins difficile de prévoir avec précision la localisation, l'intensité et la fréquence de ces phénomènes (figure 12).

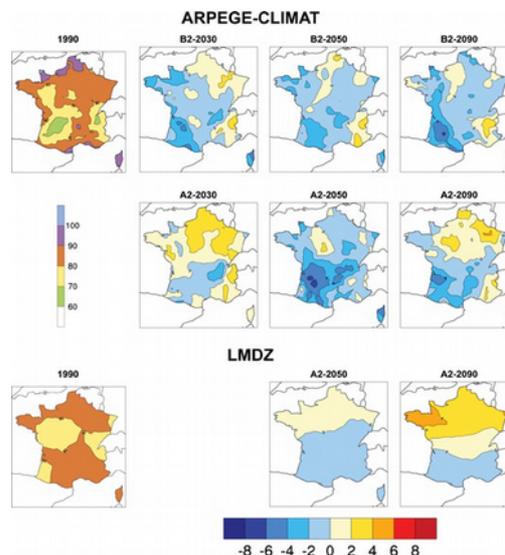


Figure 12 : Indice V01. Vent maximal annuel, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Unité : km/h. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

Certains résultats sont toutefois disponibles grâce aux travaux de modélisation réalisés dans le cadre de l'IMFEX qui utilisent les modèles ARPEGE et LMDz. On prévoit ainsi une faible augmentation de la vitesse des vents les plus forts (indice V01) sur la partie septentrionale du pays, et une faible diminution dans le Sud de la France.

¹¹L'agressivité de l'eau caractérise son aptitude à provoquer la corrosion des matériaux au contact desquels elle est, ainsi qu'à dissoudre le calcaire.

2.4.2 - Tendances climatiques significatives retenues

- Les modélisations des évolutions des régimes de vents sont très incertaines.

2.5 - Évolution du niveau des mers (submersion marine) et modification du climat de houle

2.5.1 - Évolution du niveau marin

Description

La submersion marine est une inondation de la zone côtière par la mer. Celle-ci peut se produire suite à des événements météorologiques majeurs comme des vents violents, des fortes houles, des tempêtes : dans ce cas, il s'agit d'un événement temporaire et rapide. Des submersions marines permanentes sont également attendues avec la montée du niveau de la mer due au changement climatique. Il s'agit alors d'un phénomène lent, inexorable. Ce phénomène est détaillé ci-dessous.

Le volume total des océans peut varier à cause de la fonte des glaciers continentaux (Groenland et Antarctique particulièrement). Le volume des océans est également fonction de sa température, elle-même liée à la température moyenne de l'atmosphère. Le réchauffement climatique, entraîne une dilatation thermique qui a pour conséquence une élévation du niveau de la mer. Cette expansion thermique serait la cause principale de l'élévation du niveau moyen de la mer.

Le réchauffement des océans est très lent et une élévation de la température moyenne de l'atmosphère se traduit par une dilatation des océans quelques décennies plus tard. L'inertie thermique des océans est beaucoup plus grande que celle de l'air. Le système met des siècles à se stabiliser. Le niveau de la mer monte depuis la fin de la petite ère glaciaire du XVIII^e siècle, le réchauffement observé au cours du XX^e siècle jouera sur le niveau de la mer du XXI^e.

L'élévation moyenne constatée masque une grande diversité locale. Des phénomènes locaux peuvent avoir une importance du même ordre que l'élévation moyenne en s'y additionnant ou en s'y soustrayant. Les modifications climatiques peuvent affecter courants et vents dominants qui forment le relief des océans d'amplitude supérieure au mètre. Les changements de régime, non liés à l'élévation du niveau moyen des océans, sont difficilement prévisibles (on évoque ainsi régulièrement la disparition du Gulf Stream) et seront d'une ampleur supérieure à l'élévation moyenne. De plus, cette élévation est du même ordre que certains mouvements locaux de la croûte terrestre. Il est donc préférable de s'appuyer sur des études locales et d'éviter d'évoquer le phénomène en général.

Données

Selon le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, le niveau moyen de la mer pourrait s'élever d'une hauteur comprise entre 23 et 51 cm entre la fin du XX^e siècle et la fin du XXI^e siècle dans le cas du scénario A2, et entre 20 et 43 cm pour le scénario B2. Ces projections restent cependant sujettes à de nombreuses incertitudes, dont celle liée à une éventuelle accélération de la fonte des calottes polaires. Les évaluations du cinquième rapport du GIEC sont nettement revues à la hausse par rapport au précédent, dont la prévision la plus élevée était de 0,59 m. Ainsi, ce dernier rapport projette une hausse moyenne au niveau mondial de 0,45 à 0,82 m à l'horizon 2100 par rapport à la période de référence 1986-2005 pour le scénario RCP 8.5 (scénario le plus pessimiste).

Parce qu'elle dépend de l'évolution locale de nombreux paramètres, la distribution régionale du changement du niveau de la mer est très difficile à estimer. Les modifications prévues en France sont incertaines, d'autant plus pour la mer Méditerranée, pour laquelle le GIEC ne donne pas de valeur. L'élévation du niveau de la mer Méditerranée est en effet difficile à estimer à l'aide des modèles globaux, car ceux-ci ne prennent pas en compte de manière réaliste les échanges d'eau entre la Méditerranée et l'océan Atlantique au niveau du détroit de Gibraltar.

Plusieurs projets utilisant des modèles à haute résolution devraient permettre d'apporter un éclairage nouveau sur la question dans un futur proche même si les incertitudes sur ces évaluations ne pourront pas être correctement estimées avant plusieurs années.

Le rapport du GIEC fournit une carte (figure 13) de la répartition de l'augmentation du niveau de l'eau tenant compte de l'influence de la densité et de la circulation océanique. Cette carte, donne l'écart (en m) de l'évolution du niveau moyen régional par rapport aux valeurs moyennes annoncées à l'échelle mondiale pour 2100. On note par exemple que, dans la région Europe, l'océan Indien et une partie du Pacifique (notamment au niveau du Japon), l'augmentation du niveau moyen serait plutôt supérieure (de l'ordre de 0 à 0,15 m) à la moyenne mondiale. Cette augmentation serait inférieure à la moyenne mondiale dans d'autres régions, par exemple à l'Ouest de l'Amérique du Sud.

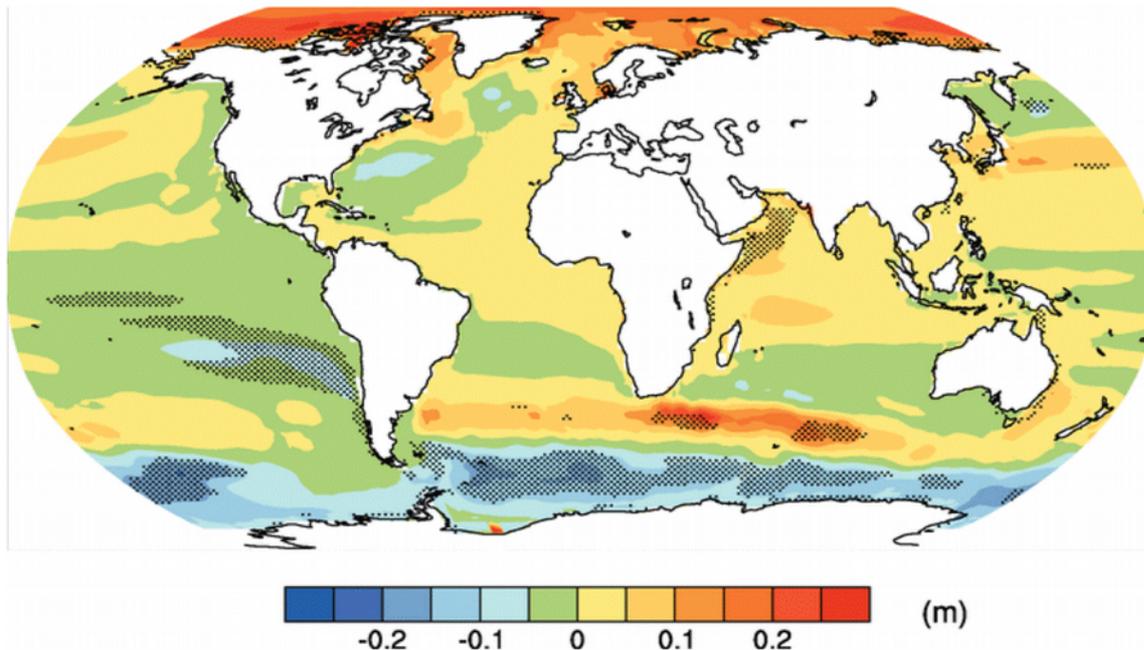


Figure 13 : Élévation du niveau de la mer relative à la moyenne globale pour la période 2080-2099 par rapport à 1980-1999. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

Une note de synthèse de l'ONERC [14] recommande de retenir pour les études à venir concernant les impacts de l'élévation du niveau de la mer sur l'ensemble des côtes françaises, Méditerranée et Outre-Mer compris, les mêmes valeurs que pour l'élévation globale du niveau de la mer et de ne pas écarter l'hypothèse extrême de 1 m.

Les directives nationales, intégrant les conséquences du changement climatique, exigent également de prendre en compte un risque d'élévation du niveau moyen de la mer à l'horizon 2100 de 1 m, c'est cette dernière donnée qui sera retenue dans ce rapport.

2.5.2 - Climat de houle au large

Il existe peu de documents traitant de l'évolution des paramètres d'états de mer avec le changement climatique. D'après les données du Cerema¹² et d'EDF-LNHE [15], le climat de houle de la zone Atlantique Nord-Est tendrait à évoluer de la façon suivante :

- diminution des paramètres moyens de hauteurs significative (Hm0) et de période moyenne (Tm02) dans le Golfe de Gascogne, à l'exception des mois d'hiver où les résultats divergent selon le scénario choisi ;
- augmentation des paramètres moyens d'états de mer en Mer du Nord : en hiver en particulier, et pour l'ensemble des saisons selon le scénario B1 ;

¹²<<http://etatsdemerfuturs.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>>

- en hiver, augmentation de la variabilité saisonnière des états de mer et augmentation des hauteurs de vagues associées aux plus forts quantiles sur une large emprise de l'Atlantique nord-est.

Ces tendances sont d'autant plus marquées que le scénario de changement climatique du GIEC est pessimiste (tendances du scénario A2 plus marquées que celles du scénario A1B, elles-mêmes plus marquées que celles du scénario B1).

Cette analyse s'applique au climat de houle au large. La remontée du niveau de la mer aura pour conséquence de réduire l'efficacité du filtre bathymétrique et donc augmenter le niveau des houles à la cote à climat de houle identique au large.

2.5.3 - Tendances climatiques significatives retenues

- Les prévisions relatives au niveau des mers sont incertaines, notamment au niveau local, mais tendent globalement vers une élévation du niveau marin.
- Conformément aux recommandations de l'ONERC, l'hypothèse d'élévation du niveau marin de 1 m à l'horizon 2100 sera retenue dans ce rapport.
- Il existe très peu de documentation relative aux évolutions du climat de houle.

2.6 - Événements météorologiques extrêmes

2.6.1 - Description

Le GIEC définit un **événement météorologique extrême** comme étant un événement rare selon les statistiques relatives à sa fréquence en un lieu donné [8]. Si les définitions du mot « rare » varient considérablement, un phénomène météorologique extrême devrait normalement être aussi rare, sinon plus, que les dixième ou quatre-vingt-dixième percentiles. Par définition, les caractéristiques de ce qu'on appelle « conditions météorologiques extrêmes » varient d'un endroit à l'autre.

La France, de par sa position géographique et la présence des territoires d'outre-mer est soumise à de nombreux événements climatiques :

- **les événements climatiques liés aux températures** : vagues de froid, canicules, brouillards, feux de forêts ;
- **les événements climatiques extrêmes liés aux précipitations** : tempête de neige, fortes pluies, grains violents, inondations, vagues littorales ;
- **les événements climatiques extrêmes liés aux vents** : cyclones, ouragans, tempêtes, tornades, vagues littorales.

Selon le GIEC [7], la variabilité des phénomènes extrêmes, comme la sécheresse, les cyclones tropicaux, les températures extrêmes ou la fréquence et l'intensité des précipitations, est plus difficile à analyser et à surveiller que les moyennes climatiques, car cela nécessite de longues séries chronologiques de données à haute résolution spatiale et temporelle.

Ainsi, dans ce document seront considérés comme connus tous les événements extrêmes susceptibles de se reproduire voir d'augmenter en fréquence sauf en ce qui concerne les événements liés aux températures basses (neige, brouillard) qui tendent à diminuer selon les différentes modélisations.

Pour les indices relatifs aux **extrêmes chauds**, les résultats des simulations selon les deux scénarios montrent une tendance à **l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de ces extrêmes**. On retiendra un nombre annuel de jours de vagues de chaleur (indice T07) allant de 30 à plus de 80 en fonction de la localisation et du scénario optimiste ou pessimiste, soit en moyenne 10 fois plus qu'au début du siècle (figure 14).

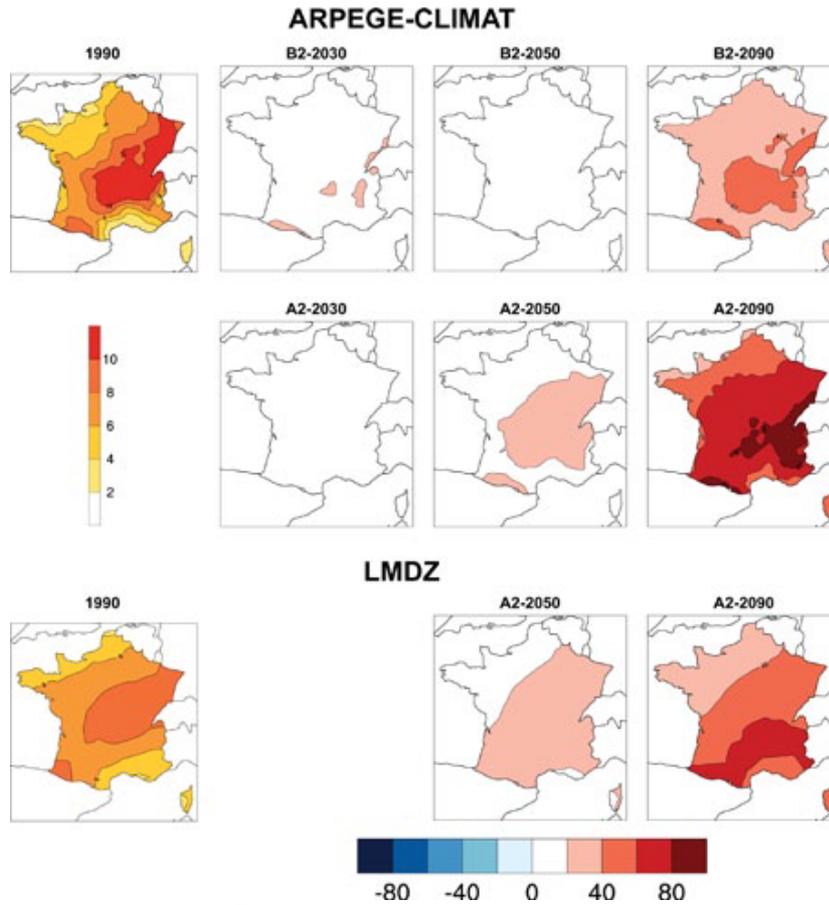


Figure 14 : Indice T07. Nombre annuel de jours de vagues de chaleur. Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

Le nombre annuel de jours où la température maximale quotidienne (indice T05) serait anormalement élevée est en très nette augmentation (figure 15). Par exemple, à l'horizon 2030, ce nombre de jours, qui est de 36 en moyenne annuelle pour la période de référence (modèle ARPEGE), augmenterait de 8 à 38 jours en moyenne (respectivement pour les scénarios A2 et B2). Actuellement, dans le Sud-Est de la France, une vingtaine de jours dépassent de 5 °C la moyenne habituelle. À horizon 2090, ce nombre augmenterait d'au moins 80 jours supplémentaires dans le cas du scénario pessimiste (A2).

Des fortes températures et des périodes de sécheresses prolongées impliqueront une augmentation de la fréquence et de l'intensité des feux de forêts. À l'inverse, les extrêmes froids ont, partout et en toute période, tendance à diminuer.

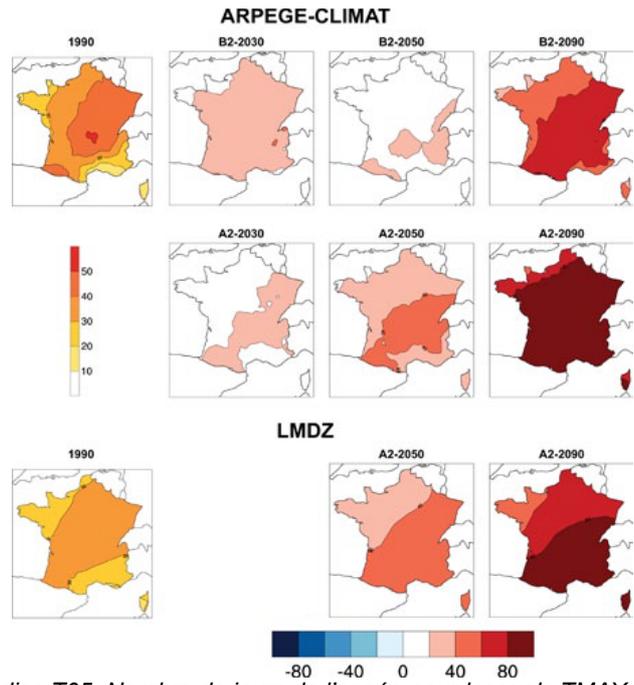


Figure 15 : Indice T05. Nombre de jours de l'année pour lesquels TMAX est supérieure à la référence de 5°C, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

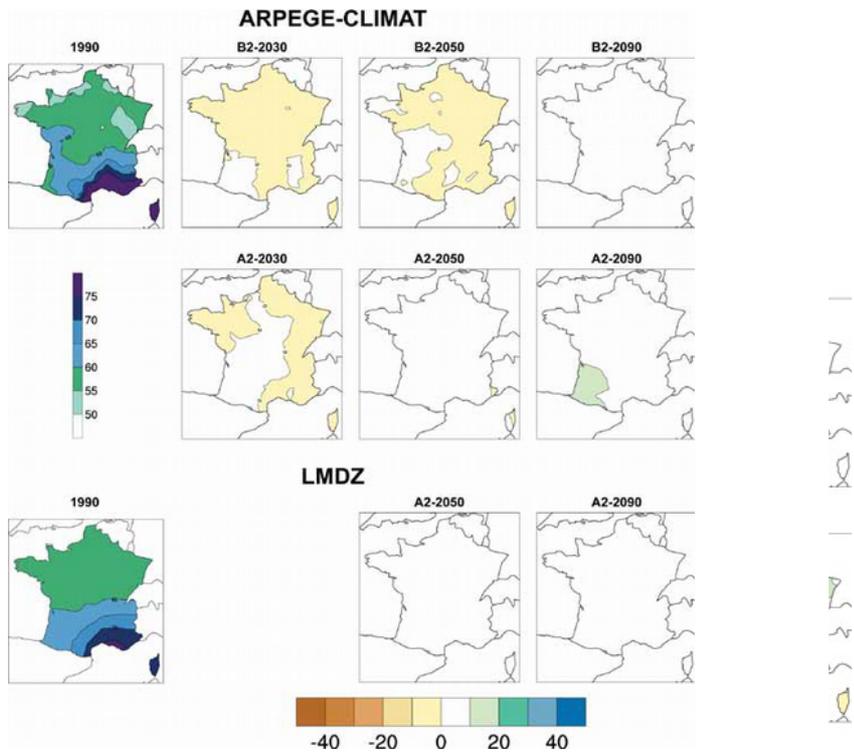


Figure 16 : Indice P02. Pourcentage des précipitations au-dessus du 90e centile annuel, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

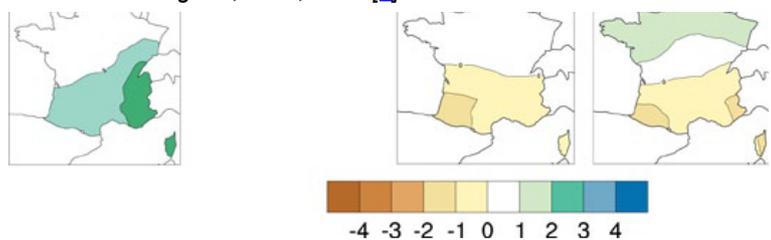


Figure 17 : Indice P03. Nombre de jours avec plus de 20 mm de précipitations, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].

Concernant le vent extrême, en métropole, on note une faible tendance à la diminution dans la partie sud du pays, tandis que le signe des changements est indéterminé sur la partie nord (chapitre 2.4).

2.6.2 - Tendances climatiques significatives retenues

- Les extrêmes chauds tendraient à augmenter en fréquence et en intensité.
- Les extrêmes liés aux précipitations tendraient à diminuer en fréquence mais augmenter en intensité.
- Les modélisations des extrêmes liés aux événements de type tempête, ouragan, etc., sont encore très incertaines.

2.7 - Évolution de la biodiversité

Cette évolution a été retenue comme aléa climatique, car elle impacte directement certains domaines, notamment celui de la sécurité aéroportuaire.

2.7.1 - Description

Ce paragraphe se concentre sur le péril aviaire, problématique essentielle de la sécurité aéroportuaire.

Les oiseaux en Europe ont modifié au cours des trente dernières années leurs aires de distribution, ainsi que leurs calendriers de reproduction et de migration, vraisemblablement en réponse au changement climatique. Les espèces d'oiseaux les plus spécialisées disparaissent au profit d'espèces plus opportunistes, concourant à l'actuelle érosion de la biodiversité à l'échelle du territoire.

Les oiseaux sont des cibles très spéciales vis-à-vis de l'impact du changement climatique pour plusieurs raisons :

- ce sont des animaux homéothermes vivant activement tout au long de l'année ;
- de nombreuses espèces d'oiseaux changent de lieu de vie 2 fois par an couvrant plusieurs zones de climat et de végétation ;
- ils ont des phases séparées (reproduction, mue, migration automnale, hivernage, migration printanière) dans leur cycle annuel et doivent s'adapter à la fois à des changements variables du climat et de l'aire de vie.

2.7.2 - Données

De nombreuses études montrent que certaines modifications observées dans le mode de vie des oiseaux répondent au changement climatique. La preuve la plus claire concerne la migration printanière des oiseaux, même s'il existe une forte hétérogénéité dans la qualité des données et des approches utilisées [16].

Une analyse récente à l'échelle du continent à partir de la base de données oiseaux en Europe [17, 18] pour la période entre 1970 et 2000 a mis en lumière un déclin des oiseaux migrateurs [19]. Sur les 30 ans d'étude, 40 % des migrants afro-paléarctiques (migrateurs longue distance qui nichent en Europe et hivernent en Afrique subsaharienne) ont montré des tendances négatives importantes. Les oiseaux migrateurs longue distance semblent plus affectés par ces déclin de population que les non-migrateurs (résidents et migrateurs courte distance) nichant dans les mêmes habitats en Europe. Les études suggèrent qu'ils seraient moins capables de s'adapter au changement que les espèces non-migratrices du fait de la taille réduite de leur cerveau et de leurs capacités limitées à résoudre des problèmes [20, 21].

Depuis les années 1970-1980, l'avifaune migratrice, en Europe comme en Amérique du Nord, a tendance à rester plus longtemps sur les territoires de reproduction. L'avancée de la migration au printemps est plus marquée chez les migrateurs courte-distance. Un départ en migration différé en automne est également parfois constaté, probablement en réponse à l'allongement de la période de végétation. Le

baguage des migrateurs en automne en Allemagne a montré que 19 espèces sur 28 ont différé leur départ en migration de 5 à 6 jours entre 1970 et 1990.

Des espèces comme le coucou ou le rossignol hivernent en Afrique subsaharienne où les sécheresses chroniques ont un impact très fort sur ces espèces. Par exemple, la sécheresse dramatique qu'a connue le Sahel en 1968, avec un cumul annuel des précipitations de 70 % en dessous de son niveau normal, a entraîné la mortalité des deux tiers des fauvettes grisettes anglaises entre 1968 et 1969. Si la mortalité due à la migration excède celle de l'hivernage sur les sites de reproduction, la sélection favorisera la sédentarisation d'espèces. À partir d'expérimentations sur la fauvette à tête noire, on a pu montrer qu'en 25 générations, soit environ 40 ans, une population totalement migratrice peut devenir totalement sédentaire : cela explique certainement que plusieurs passereaux, tels que le merle noir, le rouge-gorge et la mésange bleue, autrefois migrateurs, soient devenus partiellement sédentaires en Europe centrale au cours du XX^e siècle.

Quatre actions spécifiques sont consacrées à la biodiversité dans le PNACC afin de recueillir, entre autres, les données nécessaires et renforcer les outils de suivi existants pour prendre en compte les effets du changement climatique sur la biodiversité. Actuellement, il existe peu de données précises sur ces changements, mais certaines études confirment les modifications observées relatives au changement climatique.

Les seules observations précises constatées qui peuvent être attribuées à l'évolution du climat sont les suivantes :

- des migrations précoces d'hirondelles qui se rassemblent par centaines sur les pistes (Montpellier, La Rochelle) ;
- une augmentation des populations d'oiseaux inféodés aux milieux plutôt arides (outardes, œdicnèmes) ;
- des densités importantes de campagnols ;
- une mortalité hivernale faible sur les hérons d'où des incidents avec ces espèces (hérons cendrés et garde bœufs) ;
- des hivernages moins marqués pour certains migrateurs partiels comme les vanneaux qui descendent moins au sud que par le passé ;
- des observations d'espèces méditerranéennes comme la huppe et le guêpier plus au nord que par le passé.

2.7.3 - Tendances climatiques significatives retenues

- Les évolutions climatiques peuvent amener la faune avicole à modifier ses aires de répartition, dates de reproduction et de migrations.

2.8 - Particularité de l'Outre-Mer

2.8.1 - Description

Sous l'appellation « Outre-Mer » sont regroupées de nombreuses terres, territoires ou archipels qui sont éloignés de la métropole. Ils composent un ensemble de territoires atypiques par rapport à cette dernière du fait de leur situation géographique distante, des particularités de leur climat, de leur relief, de leur activité volcanique, de leur dispersion et de leur isolement. Les DOM-TOM bénéficient déjà d'une culture d'adaptation à des problématiques climatiques, car ce sont des territoires, qui dans leur ensemble, sont plus exposés que les territoires métropolitains.

Les Départements et Collectivités d'outre-mer (DOM-COM) représentent des zones trop petites pour que les modèles globaux en simulent les évolutions climatiques détaillées. Cependant, une configuration d'ARPEGE-Climat a permis de réaliser des simulations à haute résolution sur l'ensemble du globe avec une maille de 50 × 50 km². Deux simulations ont été effectuées dans le cadre de l'expertise dirigée par

Jean Jouzel [4], une pour la période de référence 1961-1990, et la seconde pour la période 2041-2070 (scénario A2).

2.8.2 - Données

Températures et précipitations

Ces simulations montrent que, comme sur le reste du globe, l'accroissement des températures est plus élevé sur les continents (ou sur les grandes îles, comme Madagascar) que sur les océans. Pour l'Outre-Mer, un réchauffement significatif est attendu, avec d'importantes variations entre les différentes zones géographiques. Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC confirme pour les températures les valeurs les plus pessimistes, l'augmentation moyenne mondiale pourrait être comprise entre 2.6 à 4.8 °C (scénario le plus pessimiste : RCP 8.5).

Dans le cas de l'île de La Réunion, une étude spécifique exploitant les résultats de ces simulations a été réalisée [4]. À proximité de La Réunion, le modèle prévoit un réchauffement compris entre 1,4 et 3,0 °C selon les scénarios et la saison pour la fin du siècle. Le réchauffement le plus important se produirait pendant les mois les plus chauds de l'année. En revanche, les mois les plus frais, juin juillet et août, ne subiront qu'une hausse relativement modérée.

Pour les précipitations, le cinquième rapport d'évaluation du GIEC prévoit une augmentation importante du volume des précipitations pour les hautes latitudes (zones Arctique et Antarctique : valeurs supérieures à 10 %). Pour les régions subtropicales, les valeurs sont fluctuantes d'une région à l'autre et moins significatives (tableau 3).

Régions	Température moyenne en °C	Précipitations en %
Caraïbes	+2 °C (+ 1,8 à +2,4 °C)	-12 % (-19 à -3 %)
Guyane	+3,3 °C (+2,6 à +3,7 °C)	+0 % (-3 à +6 %)
Océan Indien	+2,1 °C (+1,9 à +2,4 °C)	+4 % (+3 à +5 %)
Pacifique Sud	+1,8 °C (+1,7 à +2 °C)	+3 % (+3 à +6 %)
Nouvelle-Calédonie	+1,9 °C (+1,8 à +2,1 °C)	-6,5 % (-5 à -8 %)

Tableau 3 : Projections climatiques d'ici 2099, pour l'Outre-Mer européen pour les températures et précipitations. Scénario A1B – GIEC 2007. Les fourchettes d'incertitude (quartiles 25/75%) sont indiquées entre crochets. Source : UICN, 2008 [22].

Plus localement, les simulations citées dans le paragraphe de description ont été réalisées pour les indices liés aux précipitations dans le cas de La Réunion. La majorité des indices climatiques vont dans le sens d'un assèchement pour la période 2041-2070. Il semble également que, dans le climat futur, la part des précipitations extrêmes dans le cumul annuel sera plus importante.

Il n'existe pas d'analyses similaires pour les autres DOM-COM. Cependant, le projet EXPLORE 2070¹³ fournit des données de projections des débits des cours d'eau et des températures des eaux de surface, pour les Antilles, la Réunion et la Guyane.

Cyclones et tempêtes

Les projections climatiques sur les tempêtes tropicales et les cyclones sont encore incertaines. Néanmoins, plusieurs études projettent une hausse de leur intensité en lien avec le changement climatique mais également une diminution de leur fréquence. Ces tendances sont à prendre avec précaution mais incitent à ne pas sous estimer le phénomène.

¹³<<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-des-strategies-d.html>>

Pour les cyclones en particulier, le GIEC prévoit leur intensification dans l'ensemble des régions tropicales, avec des vents maximums plus forts et des précipitations ponctuelles plus abondantes. Cette intensification est liée à l'augmentation de la température des mers tropicales.

Niveau marin

L'augmentation du niveau de la mer prévue en Outre-Mer par le GIEC correspond à celle projetée dans la plupart des collectivités, avec cependant des variations en fonction de la région considérée (chapitre 2.5).

Climat de houle

Le Cerema a lancé une étude [15] (commandée au LNHE d'EDF) pour déterminer les climats de houle du futur dans les zones Réunion et Antilles. Cette étude permettra de connaître les perspectives d'évolution des différentes houles (en particulier cycloniques) avec le changement climatique.

Biodiversité

L'augmentation de la température des eaux marines et l'**acidification des océans** impacteront fortement l'état de santé des récifs coralliens et leur survie. Les études récentes relatives aux effets du changement climatique sur l'état de santé des récifs coralliens sont très pessimistes :

- l'augmentation de la température des eaux marines favorisera l'augmentation des phénomènes de blanchissement des coraux, phénomène pouvant conduire à la mort de coraux ;
- l'augmentation prévue de l'acidification des océans limitera fortement la croissance corallienne ;
- enfin, l'intensification des cyclones augmentera leur effet mécanique destructeur sur les formations coralliennes les plus fragiles.

Or, les formations coralliennes ont un effet de protection du littoral contre l'érosion : un massif corallien peut absorber jusqu'à 90 % de la force d'impact d'une vague. Ainsi, ces paramètres auront un effet indirect non négligeable sur les infrastructures aéroportuaires ou routières localisées sur ou à proximité de platier récifaux.

Par ailleurs, les mangroves sont dégradées par des effets mécaniques de fortes houles cycloniques et des effets chimiques liés à des phénomènes d'hyper-salinité (vents forts venant de la mer chargés en sel et montée du niveau de la mer). La dégradation des mangroves pourrait diminuer fortement leur effet de protection pour les littoraux et infrastructures littorales localisées en amont.

3 - Synthèse des tendances climatiques

Des tendances d'évolution climatique ont été calculées par le groupe de travail dans le cadre du PNACC pour différents indices définis dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [4, 5]. Elles sont indiquées dans les tableaux ci-dessous dans la colonne « intensité moyenne de l'évolution » pour une période de référence donnée. Elles ont ensuite été associées à des niveaux de confiance d'évolution. La méthodologie de calcul des tendances et de définition des niveaux de confiance est disponible en annexe 2.

Les tableaux 4, 5 et 6 synthétisent les données pour les indicateurs de température, de précipitation et de vent, ainsi que leurs évolutions.

Indices de températures	Intensité moyenne de l'évolution pour la période 2021 / 2050 (tous les modèles et scénarios considérés)	Niveau de confiance pour la tendance de l'évolution pour la période 2021 / 2050 sur une échelle de 4	Intensité moyenne de l'évolution pour la période 2071 / 2100 (tous les modèles et scénarios considérés)	Niveau de confiance pour la tendance de l'évolution pour la période 2071 / 2100 sur une échelle de 4
T01 Tmoy quotidienne	augmentera entre 1,4 et 1,9 °C	4	augmentera entre 2,8 et 3,4 °C	4
T02 Tmin quotidienne	augmentera entre 1,2 et 1,7 °C	4	augmentera entre 2,5 et 3,0 °C	4
T03 Tmax quotidienne	augmentera entre 1,4 et 2,2 °C	4	augmentera entre 3,1 et 3,8 °C	4
T04 Valeurs extrêmes de la Tmax quotidienne	augmentera entre 1,7 et 3,0 °C	4	augmentera entre 4,1 et 5,5 °C	4
Bilan : T01 – T02 – T03 – T04	Tendance à l'augmentation (entre 1,2 et 3,0 °C indices T01 à T04 confondus)	Confiance élevée	Tendance à l'augmentation (entre 2,5 et 5,5 °C indices T01 à T04 confondus)	Confiance élevée
T05 Nombre de j Tmax anormalement élevée	augmentera entre 35 et 51 j	4	augmentera entre 84 et 101 j	4
T06 Nombre de j Tmin anormalement élevée	augmentera entre 26 et 35 j	4	augmentera entre 67 et 81 j	4
T07 Nombre de jours vagues de chaleur	augmentera entre 14 et 24 j	4	augmentera entre 48 et 63 j	4
Bilan : T05 – T06 – T07	Tendance à l'augmentation (de 14 et 51 j indices T05 à T07 confondus)	Confiance élevée	Tendance à l'augmentation (de 48 et 101 j indices T05 à T07 confondus)	Confiance élevée
T08 Nombre de jours Tmin anormalement basse	diminuera entre 8 et 16 j	4	diminuera entre 13 et 20 j	4
T09 Nombre de jours à Tmax < 0	diminuera entre 3 et 9 j	4	diminuera entre 6 et 11 j	4
T10 Nombre de jours de gel (à Tmin < 0)	diminuera entre 12 et 23 j	4	diminuera entre 23 et 33 j	4
Bilan	Tendance à la diminution (entre 3 et 23 j indices T08 à T10 confondus)	Confiance élevée	Tendance à la diminution (entre 6 et 33 j indices T08 à T10 confondus)	Confiance élevée

Tableau 4 : Tableau présentant l'indicateur de température et ses tendances d'évolution (analyse des indices climatiques présentés dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [5]). L'échelle utilisée varie de 1 à 4, 4 étant le maximum. Source : Cerema.

Indices de précipitations	Intensité moyenne de l'évolution pour la période 2021 / 2050 (tous les modèles et scénarios considérés)	Niveau de confiance pour la tendance de l'évolution pour la période 2021 / 2050 sur une échelle de 4	Intensité moyenne de l'évolution pour la période 2071 / 2100 (tous les modèles et scénarios considérés)	Niveau de confiance pour la tendance de l'évolution pour la période 2071 / 2100 sur une échelle de 4
P01 Précipitations quotidiennes moyennes	évoluera entre 0,0 et +0,3 mm/j pas de tendance claire	Non défini	évoluera entre -0,1 et 0,2 mm/j pas de tendance claire	Non défini
P02 Valeurs extrêmes des précipitations quotidiennes pourcentage de précipitations au-dessus du 90 ^e centile	augmentera entre 0,8 et 4,0 %	2	augmentera entre 3,2 et 6,8 %	4
P03 Nombre de jours avec plus de 20 mm de précipitations	augmentera entre 1 et 3 j	2	augmentera entre 1 et 3 j	2
P04 Périodes de forte sécheresse (nombre de jours consécutifs avec moins de 1 mm de précipitations)	évoluera entre -1 et 4 j pas de tendance claire	Non défini	augmentera entre 3 et 8 j	3
P05 Nombre de jours de chute de neige	diminuera entre 6 et 10 j	4	diminuera entre 10 et 15 j	4

Tableau 5 : Tableau synthétisant les indicateurs de précipitations et leurs tendances d'évolution (analyse des indices climatiques présentés dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [5]). L'échelle utilisée varie de 1 à 4, 4 étant le maximum. Source : Cerema.

Indice de vent maximal	Intensité moyenne de l'évolution pour la période 2021 / 2050 (tous les modèles et scénarios considérés)	Niveau de confiance pour la tendance de l'évolution pour la période 2021 / 2050 sur une échelle de 4	Intensité moyenne de l'évolution pour la période 2071 / 2100 (tous les modèles et scénarios considérés)	Niveau de confiance pour la tendance de l'évolution pour la période 2071 / 2100 sur une échelle de 4
V01 Indice de vents violents (vent maximal)	évoluera entre -0,9 et 2,5 km/h pas de tendance claire	Non défini	évoluera entre -1,6 et 2,2 km/h pas de tendance claire	Non défini

Tableau 6 : Tableau présentant l'indicateur de vent violent et ses tendances d'évolution (analyse des indices climatiques présentés dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [5]). L'échelle utilisée varie de 1 à 4, 4 étant le maximum. Source : Cerema.

L'indice d'humidité des sols est fourni dans le rapport de 2011 de l'expertise dirigée par Jean Jouzel et est donné pour trois périodes différentes, d'après les résultats des scénarios A2 et B2 pour le modèle ARPEGE-Climat. Ses tendances d'évolutions sont les suivantes :

- période 2020-2039 : évoluera entre -9 et +13 kg/m² (niveau de confiance : non défini) ;
- période 2040-2059 : évoluera entre -13,5 et +7 kg/m² (niveau de confiance : non défini) ;
- période 2080-2099 : diminuera entre 0,5 et 23,5 kg/m² (niveau de confiance : 2 sur une échelle de 4) ;

Le rapport de l'expertise dirigée par Jean Jouzel ne fournit pas d'indices pour les évolutions du climat de houle et du niveau marin, mais donne des tendances chiffrées (moyennes) pour le second paramètre. Le niveau marin tendrait à augmenter, mais des incertitudes importantes demeurent en particulier sur les aspects régionaux. Compte tenu des incertitudes liées aux projections et du manque de précision des moyens cartographiques, le rapport du GIEC propose de ne pas différencier les hypothèses selon les scénarios. Ainsi, les hypothèses retenues à l'horizon 2100 sont les suivantes :

- hypothèse optimiste : 0,40 m ;
- hypothèse pessimiste : 0,60 m ;
- hypothèse extrême : 1 m.

En ce qui concerne le climat de houle, il existe peu de documents traitant de l'évolution des paramètres d'états de mer. Selon les travaux du Cerema et d'EDF-LNHE [15], on peut s'attendre à une diminution (sauf en hiver) des hauteurs de vagues dans le Golfe de Gascogne et une augmentation en Mer du Nord. Ces tendances et leur saisonnalité sont très tributaires des scénarios de changement climatique considérés. Pour l'instant nous ne disposons pas d'éléments en Méditerranée et dans les DOM-COM. Une étude Cerema est en cours, elle a pour objectif d'évaluer les climats de houle du futur dans les zones Réunion et Antilles.

Chapitre

Impacts potentiels des évolutions climatiques attendues sur les infrastructures de transport

Au fil de la réflexion, le groupe de travail s'est posé un certain nombre d'interrogations quant aux impacts potentiels du changement climatique sur le patrimoine existant.

Ce chapitre rassemble les interrogations sur le devenir des infrastructures face à des modifications tendanciennes du climat et pas seulement une prise en compte limitée des évolutions climatiques majeures. Il a été également souligné que la prise en compte du climat **devrait intervenir dès la conception des ouvrages** ; par exemple, il convient de prendre en compte la topographie, la rose des vents et l'exposition au soleil pour positionner une route pour éviter les zones où les conditions hivernales poseront problème. Ainsi la formule « être bien adapté au changement climatique c'est déjà être adapté à la variabilité actuelle du climat » prend tout son sens.

Les différents impacts du climat et du changement climatique sont présentés par la suite de la façon suivante : pour chaque paramètre climatique – température, pluviométrie, vent, niveau des mers et climat de houle et biodiversité – les impacts sont présentés pour les infrastructures et systèmes suivants : infrastructures routières, ouvrages en terre, ouvrages d'art routiers, infrastructures ferroviaires y compris transports guidés (de type métros, chemins de fer secondaires et touristiques), fluviales, portuaires et maritimes, aéroportuaires, systèmes de transport par câbles. Pour le réseau ferroviaire, nous nous intéressons au réseau national et au réseau secondaire, sauf exception mentionnée dans les paragraphes concernés. Les impacts potentiels des évolutions tendanciennes des moyennes et des extrêmes climatiques ont été regroupés, car il est parfois difficile de les distinguer du point de vue de leurs valeurs et de leurs impacts sur les infrastructures. Les impacts attendus pour la France métropolitaine et d'outre-mer ont également été regroupés, lorsque ces impacts potentiels diffèrent, les spécificités locales ont été précisées.

4 - Impacts des évolutions de la température

4.1 - Sur les infrastructures routières

Les infrastructures routières recouvrent le corps de chaussées et les équipements routiers (sécurité, ouvrages d'assainissement).

4.1.1 - Infrastructures

La doctrine française de dimensionnement de chaussée prend en compte les températures subies par les enrobés à travers la notion de température équivalente. Une augmentation de la température moyenne aura une répercussion sur la température équivalente et donc, sur le dimensionnement des chaussées bitumineuses. Les durées de périodes de gel et son intensité tendraient à diminuer. Les dimensionnements au gel actuel deviendraient alors surdimensionnés, notamment au regard de l'indice de référence qui reste le plus fort connu depuis 1951.

L'**augmentation des températures maximales** peut impacter les chaussées et particulièrement les couches de surface en provoquant leur déformation. Les phénomènes d'orniérage, fluage et ressuage des chaussées pourraient être plus importants.

Par ailleurs, une augmentation en intensité des températures extrêmes chaudes risque de complexifier le choix des bitumes. Ceux-ci devront être plus durs, de sorte à être moins plastiques sous l'effet des températures élevées. Or, plus un bitume est dur, plus il devient cassant sous l'effet du froid. Enfin, un maintien des températures extrêmes basses associé à une augmentation en intensité des extrêmes chauds entraîne une augmentation des amplitudes de températures. Or, les bitumes qui répondent favorablement sur ces plus grandes amplitudes de températures sont relativement rares.

4.1.2 - Exploitation

La **diminution progressive du nombre de jours de verglas et des chutes de neige** s'accompagnera de la **réduction des interventions de viabilité hivernale** effectuées par les gestionnaires routiers et autoroutiers. Elle tendra à faciliter et à fiabiliser la circulation sur ces axes.

Les sécheresses pourraient provoquer des risques d'**incendies de forêts** rendant certaines infrastructures routières exposées plus vulnérables, en raison de problèmes de visibilité pour les usagers et de coupures d'axes. Par ailleurs, en cas de **forte chaleur**, les **pics de pollution** sont plus fréquents. Des restrictions de circulation et autres mesures de prévention et gestion pourraient être déclenchées plus fréquemment.

4.2 - Sur les ouvrages en terre

Les ouvrages en terre comprennent les remblais et déblais réalisés pour une infrastructure, qu'elle soit terrestre ou maritime.

L'augmentation des températures, surtout si elle est associée à une période de sécheresse, a un impact notamment sur les sols argileux et peut alors affecter localement et de façon plus ou moins modérée le réseau :

- par augmentation des dégradations mécaniques :
 - tassements dus à l'évapotranspiration ;
 - apparition de phénomènes de retrait, pouvant engendrer des fissurations sur les plates-formes routières (figure 18). Sur les couches de chaussée, cet impact n'est pas notable si l'on considère le cycle de renouvellement attendu en exploitation normale. Le risque principal concerne donc les couches de fondation. Sur le réseau principal, pour lequel la conception est robuste et l'entretien efficace, le risque est faible. Sur le réseau secondaire, des travaux de reprise des couches de fondation sont prévisibles notamment sur des profils rasants ;

- instabilités superficielles de talus, dues aux phénomènes de retrait et à l'engazonnement moins efficace des talus en cas de sécheresse ;
- lors de la mise en œuvre : en phase chantier, des difficultés de maintien de l'état hydrique lors des phases d'exécution, causées par une évaporation intense, pourraient être rencontrées. Ces difficultés seront d'autant plus importantes que des arrêtés de restriction d'usage de l'eau pourraient être de plus en plus fréquents ;
- impacts sur l'environnement : en cas de températures élevées ou de sécheresses, l'arrosage des sols afin d'éviter l'envol des poussières serait restreint, ainsi que la possibilité d'usage de l'eau dans le cas de teneurs en eau à augmenter. Le recours à un compactage plus intense et donc à la réalisation de planches d'essais face à ces matériaux dans un état sec à très sec deviendra plus fréquent.

L'action de la seule augmentation de température a une influence faible sur ces phénomènes.



Figure 18 : Photographie d'un remblai situé sur la RN158 à Macé (61) dont les désordres (fissurations et tassements) se sont aggravés suite à l'été 2003. Source : Cerema, DTerNC.

Exemple d'impacts dus à la sécheresse

La sécheresse provoque le retrait des sols argileux et des tassements différentiels qui induisent des désordres sur les routes (fissures longitudinales d'adaptation et tassements de rive). Ces désordres exposent particulièrement les deux-roues et entraînent des coûts d'entretien importants pour les gestionnaires (de l'ordre de 80 à 100 k€ par an à l'échelle d'un département exposé).

Le CEREMA, dans le cadre des opérations de recherche auxquelles il participe¹⁴, a instrumenté plusieurs sections de routes sinistrées en Indre (36) et Loir-et-Cher (41). Ces travaux ont mis en évidence une saisonnalité des phénomènes, l'importance de la lithologie des sols et de l'environnement dans la cinétique et la profondeur de la dessiccation. Sur une section test, le Cerema a préconisé la mise en œuvre d'une solution de réparation de type « encapsulement de la route ». L'encapsulement est obtenu par réalisation d'une tranchée (de 1 à 1,65 m de profondeur) et par la mise en place de béton. L'expérimentation a abouti à une stabilisation des teneurs en eau du sol et une réduction significative des désordres constatés en surface.

4.3 - Sur les ouvrages d'art

¹⁴Il s'agit de l'ORSI CCLEAR : Impact du changement climatique sur les chaussées (<<http://actions-incitatives.ifsttar.fr/orsis-risques-et-environnement/encours/cclear/>>), en complément des ORSI Sécheresse 1 et 2 (<<http://actions-incitatives.ifsttar.fr/orsis-risques-et-environnement/encours/secheresse2/>>).

Le paramètre « température » agit sur les ouvrages de plusieurs manières.

4.3.1 - Mise en œuvre du béton

Une température élevée peut être l'une des causes de la fissuration du béton en cours de durcissement du fait de son séchage naturel (retrait de dessiccation). Par temps froid, en l'absence de précautions, l'eau du béton peut geler (ce risque est à distinguer de celui induit par les cycles de gel / dégel). La forte augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment crée également des écarts de température entre le cœur des pièces coulées et leur surface, et / ou entre les pièces minces et épaisses d'une même pièce, ce qui provoque des déformations gênées et donc des risques de fissuration (retrait thermique). Enfin, dans certains cas, si la température du béton a été trop élevée lors de sa prise, une réaction sulfatique interne peut se produire durant la vie de l'ouvrage. Elle se traduit par un gonflement interne et donc une fissuration du matériau. L'évolution des températures et des phénomènes extrêmes¹⁵ associés peut donc, si ce n'est altérer la qualité des bétons, conduire à des restrictions de mise en œuvre préjudiciables pour l'activité économique et le bon avancement des chantiers.

4.3.2 - Comportement de l'acier à basse température

Si la température de l'acier descend en dessous d'un certain seuil, l'acier présente des caractéristiques de fragilité se traduisant par une rupture sans déformation plastique. Cela concerne notamment les aciers très anciens. L'augmentation de la température moyenne aurait donc un effet favorable pour les ouvrages métalliques.

4.3.3 - Actions structurales, par dilatation thermique des matériaux

Tous les matériaux utilisés pour constituer un ouvrage et, par conséquent, tous les ouvrages, quels que soient leur type, sont affectés par le phénomène de dilatation thermique. Les variations de température provoquent des déplacements relatifs des différents éléments de structure ou, quand ceux-ci ne sont pas possibles, des efforts. Elles peuvent entraîner un allongement ou un raccourcissement de la structure porteuse, une courbure des poutres et, du fait d'une répartition non linéaire de la température dans la section, l'apparition d'auto-contraintes.

Les règles de conception et de dimensionnement tiennent compte de ces dilatations pour éviter tout désordre que celles-ci pourraient entraîner. Elles ont évolué, en particulier en adoptant des plages de variation de la température et des valeurs extrêmes plus contraignantes. De manière générale, **l'impact d'une augmentation de température due au changement climatique sur les ponts conçus aujourd'hui peut être jugé peu significatif**. Des interventions sur les équipements spécifiques des ouvrages (joints de dilatation, appareils d'appui) peuvent souvent largement les réduire ou les supprimer. La nécessité d'effectuer ces interventions avant le remplacement de ces équipements dans le cadre de la maintenance normale devrait être rare – sauf éventuellement en cas de longues périodes de canicule (ou de grand froid). De telles interventions ne sont d'ailleurs généralement pas complexes à réaliser.

Pour les **ponts qui seront construits dans les prochaines décennies, selon une durée de projet de 100 ans**, ce changement des hypothèses relatives à la température n'a pas d'impact. En effet, les amplitudes et valeurs extrêmes sont telles qu'**elles ne conduiront pas à des sur-dimensionnements** (sauf, éventuellement, pour les ouvrages conçus sans joint de dilatation pour faciliter leur maintenance comme les « ponts intégraux » ou les systèmes hyperstatiques).

Il en va différemment des ouvrages existants. Les répartitions de température non uniformes dans un tablier de pont dépendent de l'ensoleillement, du vent et dans le cas des ponts mixtes, des différences de capacité et de conductivité thermiques de l'acier et du béton. Ces répartitions non uniformes existent dans le sens de la hauteur mais aussi de façon transversale. Elles affectent également les piles et les parois des structures en contact avec des milieux de températures différentes. Ces phénomènes engendrent des états d'auto-contrainte qui peuvent s'avérer préjudiciables pour l'intégrité du béton, en

¹⁵Pour réduire les risques, dans la conception et le dimensionnement de renforcements d'ouvrages ou d'amélioration de leur environnement, les événements extrêmes et les valeurs moyennes sont généralement pris en compte dans le même projet puisque ce sont les mêmes réponses techniques qui seront adoptées. Le coût du sur-dimensionnement associé à la valeur de l'événement extrême est faible par rapport au coût global des conséquences de cet événement.

particulier pour des ouvrages dont l'effet de la température a été très mal pris en compte dans le dimensionnement. C'est notamment le cas des systèmes hyperstatiques. Comme les conditions d'appui ne permettent pas aux déformations de se faire librement, des efforts intérieurs prendront naissance.

Pour le **patrimoine existant**, les ouvrages les plus anciens sont potentiellement les plus sensibles, mais corrélativement, moins concernés sur la durée en raison de leur vétusté ou obsolescence. Certains d'entre-eux ne verront donc que partiellement les effets du changement climatique.

4.3.4 - Action sur la durabilité des matériaux

Les dégradations dues aux cycles de gel-dégel affectent principalement les parties non protégées par revêtement étanche et sont amplifiées par l'utilisation de sels de déverglaçage. L'intensité de la dégradation dépend de la porosité du matériau et de son degré de saturation. Les sels, quant à eux, peuvent provoquer une micro-fissuration résultant de la chute brutale de température du matériau lorsque fond la couche de glace par suite de la pénétration des ions chlorures. La gélivité des granulats a également une importance sur la résistance des bétons aux basses températures. L'augmentation de la température moyenne se traduira par une diminution des jours de gel et donc, de l'utilisation de sels de déverglaçage. Ceci aurait un effet qualitativement favorable sur la durabilité des matériaux. Cet effet positif pourrait être contrebalancé en cas d'augmentation des cycles de gel / dégel.

La réduction des quantités de sels de déverglaçage utilisés devraient également se traduire favorablement vis-à-vis du risque de pénétration des chlorures. Cet effet positif peut s'avérer ici aussi limité s'il se traduit simultanément par une augmentation des cycles d'humidification / séchage. Cette augmentation de cycles humidification / séchage peut également conduire à un risque accru de carbonatation pour les ouvrages existants (pour des ouvrages neufs, le fascicule n°65 du Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux [23] impose une classe d'agressivité maximale XC4).

Pour les ouvrages de soutènement, la température n'est pas prise en compte.

Pour les tunnels, les incidences éventuelles d'une évolution des températures concernent essentiellement la ventilation et donc la consommation électrique. Les effets peuvent être favorables ou non.

4.4 - Dans le domaine ferré

4.4.1 - Températures élevées

La période estivale peut, lors d'épisode de fortes chaleurs ou de canicule ou lors d'écart importants de température dans un laps de temps court, avoir des impacts sur le réseau. Ces impacts correspondent le plus souvent à des déformations de voies, qui impliquent des limitations de vitesse ou provoquent la détente des caténaires et peuvent produire des ruptures d'alimentation électrique.

Objet ferroviaire : voie

On sait par retour d'expérience que les **températures extrêmes** (canicule) peuvent entraîner une **dilatation des rails**. En effet, la **température maximale du rail** sur le Réseau Ferré National (RFN) est de 60 °C. Ce paramètre permet déterminer le niveau maximal de contrainte dans le rail et de dimensionner les composants et le règles de maintenance associées : rails, attaches, traverses, profil de ballast et qualité.

Ces éléments permettent d'**illustrer la prise en compte des conditions climatiques dans la conception des infrastructures ferroviaires**. Les perturbations n'interviennent donc qu'en cas de défaillance d'un constituant ou le non-respect des règles de construction de la voie ferrée (par exemple, le non-respect des profils de ballast).

Pour éviter toute dégradation de la voie due aux conditions climatiques, des cycles de surveillance sont effectués afin de garantir le respect des règles de pose à tout moment de la vie de la voie ferrée. Les cycles de surveillance, leur thème, et leurs procédures sont détaillés dans des référentiels SNCF. Les tournées chaleur sont organisées conformément à ce référentiel dès que la température du rail peut

dépasser 45 °C. Ces tournées permettent de détecter les écarts par rapports aux règles de pose et d'entretien des voies ferrées et de les corriger avant les périodes de froids ou de chaleur. Si les zones détectées ne peuvent pas être corrigées, des surveillances spécifiques sont mises en œuvre.

La notion de tournée de chaleur est inexistante en tramway, mais des cycles de surveillance sont définis dans les règlements de sécurité et d'exploitation de chaque réseau. Le contenu peut être adapté en période de forte chaleur pour repérer suffisamment tôt les potentielles dégradations.

À partir de 65 °C, des limitations temporaires de vitesse (LTV) à 80 km/h sont mises en place et un arrêt des circulations selon les observations effectuées lors des tournées peut intervenir.

Les observations rapportées plus haut pour le réseau ferré national sont applicables aux réseaux de chemin de fer secondaires, hors problématique de caténaire et avec des vitesses plus réduites. À noter cependant que le Long Rail Soudé (LRS) n'est pas utilisé en profil difficile, le réglage des joints devenant alors un point délicat rigoureusement contrôlé par les exploitants.

Objet ferroviaire : signalisation

Il est important de surveiller les systèmes en charge de la régulation de la température du local technique dans lequel se trouve un système informatique. Tous les systèmes informatiques sont conçus pour fonctionner dans un air ambiant (celui du local technique) dont la température est de l'ordre de +18 à +27 °C (bâtiment climatisé). En-dehors de cette plage de température, des perturbations de l'exploitation peuvent se produire.

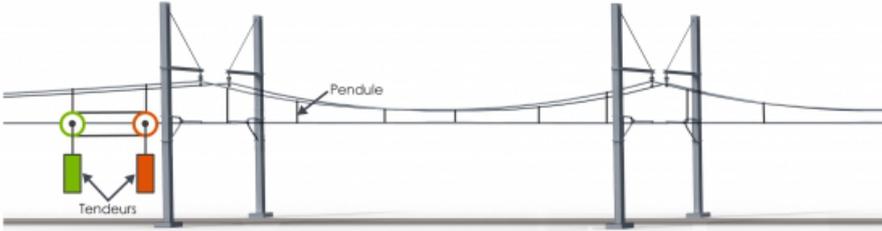
Objet ferroviaire : système caténaire

Les caténaires 1500 V installées sur certaines lignes sont dites semi-régularisées (régularisation uniquement des fils de contacts). Cette régularisation est calculée pour des températures allant de 2,5 à 47,5 °C. Au-delà de 47,5 °C, le fil de contact n'est plus régularisé et se « détend » de manière proportionnelle à la hausse de température (figure 19).

Les lignes aériennes de contact pour les systèmes Tramways (alimentation en 600 - 750 V) sont impactées de façon similaire. Les règlements de sécurité et d'exploitation prévoient des dispositions de vérifications régulières par les conducteurs, et d'interventions – le cas échéant – par les équipes de maintenance. De manière globale, il n'y a pas de retour d'expérience négatif pour ce qui est des températures extrêmes sur le sujet en tramway.

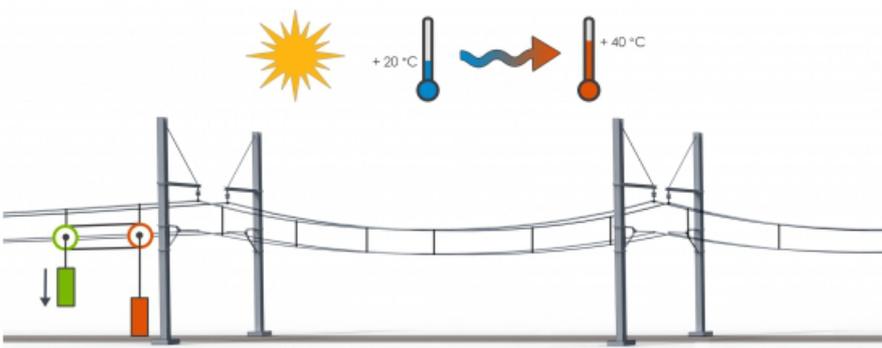
COMPORTEMENT DES CÂBLES D'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE EN CAS DE FORTES CHALEURS

Situation normale



Pour fonctionner correctement, les câbles d'alimentation électrique du réseau ferré national doivent être parfaitement rectilignes. Pour cela, ils sont suspendus à des fils verticaux, les pendules et également soumis à une tension constante par des appareils tendeurs (poulies et contrepoids). Ces appareils permettent de compenser les phénomènes de variation de température. L'été, le câble d'alimentation électrique se dilate, le contrepoids descend. L'hiver il se rétracte, le contrepoids remonte.

Conditions climatiques exceptionnelles



Lors de conditions climatiques exceptionnelles, avec de fortes variations de températures, les contrepoids peuvent temporairement toucher le sol et les câbles d'alimentation électrique se détendent. Cette situation rend plus difficile la circulation des trains et peut donc amener à réduire temporairement leur vitesse. Il faut plusieurs heures pour que le jeu de contrepoids rétablisse progressivement une bonne tension du câble d'alimentation électrique.



Figure 19 : Illustration des comportements des câbles d'alimentation électrique en cas de fortes chaleurs. Source : SNCF.

Objet ferroviaire : matériel roulant

Le groupe de climatisation peut fonctionner jusqu'à une température de +50 °C. Ses performances ne sont, quant à elles, exigées que jusqu'à +35 °C, valeur après laquelle la puissance de la climatisation est

délestée. Au-delà de cette température, on tolère un fonctionnement à 50 % des performances, soit techniquement le fonctionnement d'un compresseur sur deux.

Le groupe de production d'air est dimensionné pour tenir à une température ambiante extérieure de 40 °C. Cette exigence ne prend donc pas en compte la classification de la température spécifiée à +45 °C. Afin d'y palier et de protéger le groupe de production d'air, un système de délestage de puissance est mis au point. Il permet de permuter l'utilisation des groupes de production d'air et ainsi, de soulager ceux qui risquent une montée excessive en température.

Le groupe de refroidissement se compose de deux circuits, le circuit haute température (HT) et le circuit basse température (BT). Le circuit HT est dimensionné pour une température allant jusqu'à 95 °C en sortie moteur, considérée comme étant le point le plus chaud du groupe. Le circuit BT est dimensionné pour une température de 50 °C et peut aller exceptionnellement jusqu'à 60 °C avant le détachement de la puissance du moteur. Les températures de dimensionnement du groupe de refroidissement correspondent à une température ambiante extérieure de +35 °C. Au-delà de cette température, la puissance du moteur est délestée jusqu'à 30 %.

Cas particuliers des Lignes à Grande Vitesse (LGV)

La tournée de forte chaleur en train est à réaliser dès le troisième jour où la température maximale de l'air ambiant est susceptible d'atteindre 34 °C, à la suite des troncs communs temporaires, pour les domaines concernés. Elle cessera dès que la température maximale de l'air sera redescendue au-dessous de 34 °C pendant au moins deux jours consécutifs.

Une limitation temporaire de vitesse à 80 km/h est à appliquer pour tous les trains, a minima entre 13 h et 19 h, dès le troisième jour pour lequel on a : $T^{\circ}\text{air} > 34^{\circ}\text{C}$:

- si la surveillance spécifique aux périodes de forte chaleur n'a pu être mise en œuvre ;
- sur les zones qui nécessitaient une relibération, si celle-ci n'a pas été réalisée.

Impacts pour l'exploitation

Les élévations de températures estivales peuvent avoir une incidence sur la circulation des trains. Certains matériels roulants peuvent connaître des défaillances liées à la chaleur, qui se traduisent par des retards et suppressions généralement imprévisibles et plus difficiles à expliquer en communication. D'autre part, ces épisodes caniculaires ont des impacts sur le confort voire la santé des voyageurs. Enfin, les feux de talus (incendies aux abords des voies) peuvent provoquer d'importants retards compte tenu des délais d'intervention des pompiers.

4.4.2 - Températures hivernales

De façon générale, l'élévation des moyennes minimales de température devrait avoir un impact positif pour le domaine ferré.

Objet ferroviaire : voie

Concernant la voie, la température de libération des contraintes calculée pour la pose du rail est généralement de 25 °C. Le froid augmente les contraintes dans le rail, pouvant aller jusqu'à la rupture. Des tournées en saisons froides sont menées. Les remplacements de rails défectueux sont effectués dans la plage de température définie par rapport à une température de référence du LRS. Limitation temporaire de vitesse et arrêt des circulations sont possibles selon les observations effectuées lors des tournées de surveillance.

Objet ferroviaire : sous-station

Concernant les sous-stations, la partie HTBT (non RTE) de la sous-station est dimensionnée pour fonctionner à des températures de -25 °C, jusque -30 °C. Au-delà, des perturbations de l'exploitation peuvent apparaître.

Objet ferroviaire : système caténaire

Les caténaires 1500 V installées sur certaines lignes sont dites semi-régularisées (régularisation uniquement des fils de contacts). Cette régularisation est calculée pour des températures allant de 2,5 °C

à 47,5 °C. En deçà de 2,5 °C le fil de contact n'est plus régularisé et se « tend » de manière proportionnelle à la baisse de température.

4.5 - Dans le domaine fluvial

L'augmentation des températures et l'intensification des vagues de chaleur, pourraient engendrer une obstruction des voies navigables par un bouchon algueux générant un frein hydraulique. La prolifération d'algues perturberait aussi le débit d'alimentation en eau de certains canaux, occasionnant un abaissement du plan d'eau. Ces phénomènes ont pu être observés durant le printemps 2011. Bien qu'aucune étude n'ait été menée sur ce sujet, il est probable que les augmentations extrêmes des températures entraînent un dysfonctionnement des systèmes d'automatisation des barrages utilisés pour la gestion de l'eau et des écluses.

La baisse du nombre de jours de gel devrait être bénéfique à l'exploitation du réseau. En effet, par grand froid, les voies navigables peuvent geler : un navire brise-glace est alors nécessaire pour permettre la bonne exploitation de la voie d'eau.

4.6 - Sur les infrastructures portuaires et maritimes

L'augmentation des températures prévue devrait avoir un **impact mineur** sur les différentes infrastructures portuaires et maritimes. Les rails des différents portiques pourraient se dilater à l'image des rails ferroviaires lors d'épisodes de chaleur importants. Ceci impacterait par conséquent le chargement / déchargement des marchandises.

4.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires

4.7.1 - Exploitation

Le territoire a connu des étés chauds et des températures anormalement élevées, comme en 2003, sans que ceci impacte l'exploitation des aéroports.

Une augmentation significative des températures moyennes et extrêmes entraînerait normalement une augmentation de la distance de décollage : certains avions ne pourraient alors plus être accueillis dans les aéroports. Ces impacts sont toutefois à relativiser :

- de nombreux aéroports sont déjà adaptés a priori au changement climatique, car la longueur des pistes est surdimensionnée. À titre d'exemple, la ville de Madrid en Espagne dispose de conditions climatiques similaires à celles qui pourraient être rencontrées en France (à l'aéroport de Charles de Gaulle notamment) d'ici la fin du siècle avec une contrainte altimétrique forte (610 m d'altitude). Pour un type de trafic avions (catégories accueillies) équivalent, l'aéroport de Madrid-Barajas dispose d'une longueur de piste maximale de 4350 m, celui de Roissy Charles-de-Gaulle d'une longueur maximale de 4215 m pour une altitude de 119 m.
- Par ailleurs, l'arrivée très probable de nouvelles technologies permettant l'augmentation de la puissance des moteurs, devrait résoudre ces problèmes.

Enfin, elle pourrait entraîner une diminution de l'utilisation de glycol, ce qui aurait des conséquences positives d'un point de vue environnemental.

Certains **postes de travail** sur un aéroport sont directement exposés aux conditions climatiques, notamment les fonctions liées à l'escale de l'avion sur l'aire de trafic. Les canicules augmentent la **pénibilité** de ce type de travail, un aéroport ne pouvant pas interrompre son activité pendant les heures les plus chaudes de la journée.

L'impact sur les bâtiments se traduirait par une tendance à la hausse du nombre de degrés jours de climatisation et donc, **une hausse des consommations pour le refroidissement** en été. Toutefois cette augmentation est contrebalancée par la baisse des besoins en chauffage du fait de la diminution des températures froides.

Par ailleurs, la **sécheresse** liée à l'augmentation des températures et des périodes de fortes chaleurs pourrait provoquer une **augmentation du nombre de feux de forêts incontrôlés**. Ceux-ci pourraient alors induire des perturbations de trafic pour des raisons de mauvaise visibilité et des risques d'incendies sur les plates-formes situées en bordure de massifs forestiers.

4.7.2 - Infrastructures

La sécheresse pourrait également provoquer l'**usure prématurée** des aires de mouvement ainsi que des dommages importants aux bâtiments sur les **terrains argileux**.

4.8 - Sur les installations de transport par câbles

L'impact des très basses températures est déjà pris en compte, compte-tenu des zones géographiques dans lesquelles sont implantés ces systèmes.

Une hausse des températures extrêmes n'impacterait vraisemblablement pas les transports par câbles pour les mêmes raisons de localisation géographique (altitude minorant les effets des hautes températures).

La question peut se poser dans le cadre du développement de ces systèmes en zone urbaine. Toutefois, le retour d'expérience actuel pour des systèmes déjà implantés dans d'autres pays n'a pas révélé de problématiques particulières.

Certains systèmes actuellement implantés en zone d'altitude (+ de 2 500 m), peuvent avoir une partie de leurs ouvrages ancrés dans le permafrost dont la consistance et l'épaisseur sont liées aux températures. Un dégel de ces zones pourrait à terme provoquer des éboulements ou des glissements et entraîner des dégradations sur les structures. Pour autant, ces secteurs sont peu nombreux et clairement identifiés. Certains sont d'ores et déjà instrumentés et suivis.

5 - Impacts des évolutions des précipitations

5.1 - Sur les infrastructures routières

5.1.1 - Précipitations

L'augmentation des précipitations pourra affecter la sécurité routière en exposant les automobiles à des **risques d'aquaplanage** lors de précipitations intenses.

Les infrastructures routières risquent d'être menacées par des événements pluviométriques engendrant **des ruptures de réseaux (inondations des routes, glissements de terrains) et perturbant l'exploitation des routes.**

Les caractéristiques des événements pluvieux semblent pouvoir évoluer en intensité, en particulier pour les événements extrêmes. Dans ce cas, les **infrastructures d'assainissement** de la route pourraient être insuffisantes. En effet, elles sont dimensionnées pour des pluies d'occurrence donnée (réseau national). L'impact du changement climatique pourrait alors se traduire par une augmentation du nombre de jours de dépassement de capacité des réseaux d'assainissement.

5.1.2 - Cas de la neige

La **diminution du nombre de jours de chutes de neige** est un paramètre **favorable** pour l'**exploitation des réseaux routiers**, puisqu'elle tendra à réduire les interventions de viabilité. Elle facilitera et fiabilisera la circulation sur ces axes.

5.1.3 - Niveau des nappes

La montée du niveau des nappes, non prévue dans le dimensionnement initial de la structure de chaussée, aura pour conséquence une diminution de sa durée de vie. Cependant, la possibilité d'alimentation en eau est prise en compte dans le dimensionnement au gel des chaussées. Ainsi, une plus grande sécurité devrait être prise en compte pour une infrastructure à proximité d'une nappe proche de la surface, notamment pour les épaisseurs de couche de forme.

5.2 - Sur les ouvrages en terre

5.2.1 - Précipitations

L'augmentation en intensité des valeurs extrêmes des précipitations quotidiennes risque d'accroître la **fréquence des instabilités de pentes**. Les pentes naturelles et les structures artificielles telles que les remblais ou les digues de canaux sont particulièrement concernées par ces phénomènes.

Les principales conséquences de l'augmentation des phénomènes pluviométriques intenses – phénomènes tropicaux ou crues liées à des précipitations extrêmes – attendues sur les ouvrages en terre sont des phénomènes :

- **d'érosion** de pieds de talus, de pentes ou de remblais contigus d'ouvrages hydrauliques ou d'ouvrage d'art au débouché insuffisant (figure 20) ;
- **d'instabilités** de plus grande dimension comme des glissements de terrains ou des chutes de blocs ;
- d'augmentation potentielle d'apparition de cavités souterraines : débouillage de cheminée, cavité karstique par exemple ;
- **de dégradation des matériaux de base** des remblais soumis à des imbibitions prolongées ou à des phénomènes de crues / décrues rapides du fait d'inondations plus fréquentes. Ce phénomène est d'autant plus à considérer que les ouvrages, notamment hydrauliques, ont normalement été conçus sans spécifications spéciales. Une exception concerne toutefois les ouvrages réalisés en

zone inondable, mais ces derniers n'ont pas toujours les dimensions (ouvertures) correspondantes aux données du changement climatique.

De tels phénomènes pourront causer la coupure de certains ouvrages (coulées boueuses, glissement de talus, affouillements, effondrements, chutes de blocs ...), voire la ruine d'autres (glissement généralisé, tassement de remblai ...).



Figure 20 : Photographie d'érosion de colline suite à un événement pluvieux important survenu en Bretagne le 15 janvier 2008. Source : Olivier Malassingne (Cerema).

5.2.2 - Niveau des nappes

Le battement de nappe est la variation de son niveau au cours d'une année. Si les précipitations augmentent en période hivernale (la nappe se charge alors de façon importante) et diminuent en période estivale (ce qui entraîne un appauvrissement de la ressource en eau), alors le battement de nappe est susceptible d'augmenter. Une augmentation des périodes de sécheresse en été tendrait à augmenter les battements de nappe. Ce phénomène pourrait être accentué par l'augmentation des pompages (usage industriel, irrigation...).

Les variations saisonnières du niveau piézométrique des nappes (le battement de nappe) devraient être donc accentuées. Des roches ou sols qui étaient au-dessus du niveau de la nappe en permanence subiraient alors des cycles d'ennoyage / mise à sec réguliers. Cela aura pour conséquence, dans les aquifères sensibles à l'eau tels que le gypse ou le calcaire, une augmentation des phénomènes de dissolution et de karstification. Ces phénomènes sont susceptibles de générer l'instabilité des ouvrages en terre en surface (affaissement, déstabilisation, effondrement).

5.2.3 - Sécheresse

Les périodes de **sécheresse** peuvent engendrer des **dégradations**. Celles-ci sont détaillées dans le paragraphe 4.2.

5.3 - Sur les ouvrages d'art

5.3.1 - Précipitations

Les précipitations peuvent se traduire par des crues, des remontées de nappe ou encore, des modifications de régime hydraulique des cours d'eau. Dans certaines conditions, il en résulte pour les ponts et sur les ouvrages de soutènement situés en zone inondable, entre autres, des risques d'érosion

des lits des cours d'eau et d'affouillement des fondations. L'affouillement des fondations d'un ouvrage progresse jusqu'à sa ruine, cette dernière est presque systématiquement brutale.

Une enquête de l'association mondiale de la route (AIPCR) [24] montre que la situation est semblable dans les treize pays qui y ont participé : « Le risque le plus important lié aux incidences du changement climatique sur les structures de ponts semble être une augmentation de l'intensité et de la fréquence des fortes pluies provoquant inondations et affouillements ».

À titre indicatif, un quart environ des ouvrages d'art des routes nationales sont situés en zone inondable et sont donc potentiellement vulnérables. Des études sont en cours pour évaluer les risques présents sur ces ouvrages. Les fondations des ouvrages les plus anciens ne seraient plus convenablement adaptées aux conditions actuelles de leur environnement. En effet, celui-ci a très sensiblement évolué depuis leur réalisation, en particulier du fait d'opérations d'urbanisation, de divers aménagements et de changements d'utilisation de l'espace.

Les enjeux sont importants puisque l'on compte plus de deux cent mille ponts sur l'ensemble des routes. Il convient également de considérer les nombreux murs de soutènement et certains remblais contigus d'ouvrage, qu'ils soient situés en lit mineur ou en zone inondable. Les travaux de confortement ou de protection des ouvrages à risque sont souvent difficiles à réaliser et donc d'un coût important.

Des prédictions sur l'évolution des crues ou des épisodes de précipitations permettraient de préciser ce risque et les enjeux.

Les ouvrages potentiellement vulnérables sont nombreux et les conséquences de phénomènes d'affouillement sont importantes. L'effondrement du pont de la rivière Saint-Étienne à La Réunion en est un exemple récent (figure 21).



Figure 21 : Photographies d'un pont situé sur la rivière Saint-Étienne à la Réunion qui s'est effondré le 26 février 2007 lors du passage du cyclone Gamède sur la Réunion : ce phénomène s'est accompagné de fortes précipitations qui ont provoqué l'affouillement de certaines piles et la chute successive de plusieurs travées. Source : DDE La Réunion.

L'augmentation des cycles d'humidification / séchage peut enfin engendrer un risque accru d'attaque chimique par carbonatation ou pénétration de chlorures pour les ouvrages existants.

5.3.2 - Cas de la neige

L'impact sur les ouvrages d'art de la diminution significative du nombre de jours de neige est, comme dans le cas de la diminution du jour de gel, qualitativement favorable. En effet, elle limitera les quantités

de sels de déverglaçage répandues sur les routes. Or, les sels sont des vecteurs importants de la corrosion des matériaux constitutifs des ouvrages.

5.3.3 - Sécheresse

Avec le changement climatique est attendue l'augmentation de la durée des périodes de déficit pluviométrique. Ce déficit pluviométrique, conjugué à une augmentation moyenne des températures, induit une diminution de la teneur en eau des sols de surface. Cette modification des paramètres d'état peut générer des phénomènes de retrait de sols supports à matrice argileuse et augmenter leur potentiel de gonflement (chapitre 4.2). Ce risque reste cependant modéré pour les fondations superficielles d'ouvrage d'art. Celles-ci sont en effet relativement bien protégées par leur encastrement jusqu'à des profondeurs suffisantes et par leur surface d'appui souvent importantes, qui limitent l'évaporation.

5.4 - Dans le domaine ferré

5.4.1 - Cas du givre

Le givre est susceptible de perturber l'alimentation en énergie des systèmes ferroviaires. Dans les zones où le givre est fréquent, les caténaires sont équipées de boucle de dégivrage (court-circuit et effet joule) commandées à distance par le poste de commandement. Toutefois, au vu des projections climatiques – diminution des périodes de gel – cet impact devrait être minimisé.

5.4.2 - Cas de la neige (< 10 cm) ou grêle

La neige et la glace peuvent bloquer la manœuvre des aiguilles lorsque les réchauffeurs d'aiguilles sont en panne, mais il n'y a pas de fragilité des réchauffeurs à ces événements climatiques. En cas d'absence de cet équipement, les consignes d'exploitation visent à favoriser le tracé direct : les trains n'empruntent plus les voies déviées, notamment en gare, pour ne pas risquer d'être bloqués sur un itinéraire impossible à tracer. L'événement « neige > 10 cm » ne se différencie pas de l'événement « neige < 10 cm » dans ses conséquences de base sur l'infrastructure.

S'agissant des réseaux urbains de type métro ou tramway, l'aléa de température froide et de neige est pris en compte dans la limite de conditions raisonnablement prévisibles en agglomération de plaine. Le dégivrage est assuré par le maintien permanent de circulations de trains et le chauffage des appareils de voie ou des bandes de roulement des métros à pneus. Si ces moyens ne suffisent plus, les circulations peuvent être perturbées voire interrompues en partie aérienne, surtout sur profil pentu ou en raison du dysfonctionnement possible des appareils de voie. Ces cas de figure restent très occasionnels.

S'agissant des chemins de fer secondaires en zone de montagne notamment, les systèmes sont simples et robustes (exploitation thermique ; cantonnement téléphonique). Le déneigement lourd est prévu et organisé. Le train s'est d'ailleurs avéré être le dernier moyen de transport maintenu lors des importants épisodes de l'hiver 2010.

Une accentuation des épisodes de froid et de neige est susceptible d'entraîner une paralysie temporaire et partielle des réseaux urbains de surface. Toutefois, les prévisions climatiques prévoient une baisse des précipitations neigeuses, cette évolution devrait donc avoir un effet positif pour l'exploitation.

5.4.3 - Inondation

Domaine ferré en général

On s'intéresse ici au cas où le niveau de l'eau atteint le niveau inférieur de la traverse. La voie ferrée est, en principe, circulaire tant que le rail est hors d'eau et les composants électriques, en fonctionnement. L'eau élimine le graissage des éléments mobiles des appareils de voie et accélère leur vieillissement : il faut alors renforcer les graissages périodiques des installations. L'eau perturbe le fonctionnement des circuits de voie et des moteurs d'aiguille. En zone de fort déblai, il est nécessaire de surveiller la tenue des massifs de supports caténaire en cas de glissement de terrain.

Des limitations de vitesse sont prises :

- si l'eau atteint le niveau inférieur des traverses : autorisation de franchissement à 40 km/h maximum ;
- si l'eau atteint le patin du rail le plus bas : autorisation de franchissement à 10 km/h maximum ;
- si l'eau atteint le dessus du champignon du rail le plus bas ou si le ballast est entraîné : arrêt des circulations.

Ces seuils de vitesse peuvent être relevés en fonction de l'analyse de la situation locale.

Exemple d'impacts dus à une inondation

Les 18 et 19 juin 2013, suite à la brusque montée des eaux du Gave de Pau, la ligne Lourdes-Pau avait été inondée, rendant impossibles les circulations ferroviaires. La rivière avait en effet emporté 60 mètres de remblais, le ballast et un poteau caténaire.

Les équipes de la direction Projets Système Ingénierie de l'Infrapôle Aquitaine, avec la Direction des Circulations Ferroviaires, le gestionnaire de l'infrastructure Réseau Ferré de France (RFF) et les entreprises de travaux se sont mobilisées dès le 19 juin. Elles ont défini la solution et la méthodologie à mettre en place pour restituer la voie ferrée. Les travaux ont été réalisés dans des conditions difficiles, puisque le courant du Gave de Pau est resté très fort pendant plusieurs jours.

Cas particuliers des Lignes à Grande Vitesse (LGV)

Certaines circonstances atmosphériques exceptionnelles sont susceptibles de créer un danger pour la circulation des trains ou de troubler le bon fonctionnement des installations (signaux, caténaires...). C'est notamment le cas lors de pluies torrentielles, vents violents, inondations, chutes abondantes de neige, formation de verglas, fortes gelées, etc. Durant ces intempéries graves, la surveillance des voies est exercée au cours de tournées ou de visites spéciales effectuées par les agents des équipes de la voie. Ces tournées ou visites ont pour but de vérifier qu'il n'y a pas de danger pour la circulation des trains et de prendre, le cas échéant, toutes les mesures de protection nécessaires.

Cette surveillance des installations en cas d'intempéries ne se substitue pas aux mesures préventives qui ont pour but de réduire les risques d'incidents. Aussi, est-il nécessaire de s'assurer qu'un soin tout particulier a été apporté à la réalisation des travaux préventifs, notamment :

- le suivi rigoureux des zones d'arbres dangereux, les abattages périodiques ;
- la vérification ou amélioration des dispositifs drainants ;
- les curages périodiques des drains et fossés de crête et de pied ;
- la surveillance des pieds des ouvrages en rivière ; le cas échéant, l'adaptation de la fréquence des visites à la périodicité des crues ;
- la programmation, en temps utile, des travaux de confortement de talus en remblai ou en déblai ;
- la toilette d'hiver sur les installations de signalisation.

Lors de la circulation sur une voie enneigée, de la neige peut s'accumuler sous les caisses des rames des trains à grande vitesse (TGV) et se transformer en glace. Le détachement d'un bloc de glace peut provoquer des avaries aux installations en voie (surface du rail, équipements électriques, aiguillages...). Après signalement de projection de glace, la surveillance est effectuée lors d'une tournée spéciale. Celle-ci est exécutée dès que possible, sur une zone couvrant 5 km de part et d'autre de la localisation du signalement. La tournée a pour but de déceler les éventuelles avaries citées ci-dessus. Les mesures à prendre localement pour assurer la sécurité du personnel en cas de projections de glace doivent être précisées dans un référentiel d'établissement.

5.4.4 - Niveau des nappes

Les problématiques relatives à l'évolution des nappes, décrite dans le chapitre 5.2.2, sont en grande partie applicables aux systèmes de Transports Guidés (TG), moyennant les compléments décrits dans ce paragraphe.

En transports guidés urbains, la pluie, hors inondation, ne constitue pas une gêne notoire, hormis quelques rares cas de glissance observée sur les zones en forte pente (ex : trémie de métros en entrée de tunnel) que l'on sait traiter.

Le risque inondation en agglomération est surtout à redouter :

- dans les réseaux souterrains, à l'instar du réseau RATP qui a dû être protégé de la crue centennale de Seine au moyen de barrages mobiles rapidement déployés en station ;
- pour les locaux techniques : selon le type de local impacté, des perturbations d'exploitations importantes peuvent survenir.

Pour les chemins de fer secondaires et certains chemins de fer touristiques, le risque inondation est associé à celui de crue brutale de type torrentielle, parfois à l'origine de glissements de terrains et d'éboulements. Plusieurs incidents sérieux se produisent de façon assez aléatoire mais récurrente : effondrements de berge, voies emportées, glissements de terrain, chutes de blocs. Une augmentation du risque de chutes de blocs (figure 22) est à redouter si la fréquence de phénomènes intenses venait à augmenter. Ce type d'événement peut entraîner des accidents graves par absence de visibilité ou « coup au but », comme cela a été le cas en 2014 sur le réseau des chemins de fer de Provence.



Figure 22 : Chemin de fer de Provence, février 2014. Source : STRMTG.

5.5 - Dans le domaine fluvial

5.5.1 - Précipitations

Les modifications des niveaux d'eau impactent l'exploitation. Une montée rapide des niveaux d'eau nécessite une gestion rapide des barrages, l'augmentation des crues impose un arrêt de la navigation. L'entretien des chenaux est également modifié : les mouvements sédimentaires sont augmentés en périodes de forts débits et de crue. Enfin, le dimensionnement des ouvrages, en particulier ceux de protection contre les affouillements ou contre les crues, devra être modifié.

5.5.2 - Sécheresse

Le débit réservé des rivières doit être respecté. Pour cela, en cas de sécheresse :

- des mesures d'économie des différents réservoirs, étangs et barrages qui constituent la réserve estivale sont prises ;

- dès le printemps, des regroupements de bateaux de plaisance au passage des écluses sont mis en œuvre ;
- des réductions d'enfoncement permettent de maintenir la navigation le plus longtemps possible sur les secteurs les plus critiques ;
- les horaires de navigation et le niveau d'eau sont restreints, au prix d'une réduction des chargements ;
- toutes les informations sont transmises aux préfets pour leur permettre d'arbitrer entre les différents usages de l'eau : eau potable pour les hommes et les animaux, navigation, irrigation, vie piscicole, maintien des biotopes.

Ces différentes mesures entraînent une augmentation des coûts d'exploitation et des coûts de transport.

Exemple d'impacts dus à une sécheresse

En 2011, la sécheresse a frappé plus de 55 départements. Par exemple, sur le Rhin, le débit a été inférieur cette année de 50 à 60 % aux moyennes habituelles. La hauteur d'eau est descendue en dessous du mètre en certains endroits. Cette situation a conduit les armateurs à réduire les chargements de moitié, faute d'un tirant suffisant. Afin d'assurer leurs livraisons, les opérateurs ont dû ainsi effectuer davantage de rotations ou affréter des navires supplémentaires. Le prix des transports a augmenté de 20 à 60 % par tonne transportée.

5.6 - Sur les infrastructures portuaires et maritimes

5.6.1 - Précipitations

Les pluies intenses pourraient engendrer une saturation des réseaux d'assainissement, des inondations de terre-pleins ou de bâtiments et ainsi perturber le trafic et l'exploitation du port.

5.6.2 - Niveau des nappes

Une remontée du niveau des nappes pourrait compromettre la stabilité des ouvrages de soutènement, voire entraîner leur effondrement.

5.6.3 - Sécheresse

La sécheresse devrait avoir un impact mineur sur les différentes infrastructures d'un port.

5.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires

5.7.1 - Précipitations

La baisse générale des précipitations devrait rendre l'exploitation des aéroports plus facile. Les **pluies intenses** peuvent engendrer des inondations de pistes ou de bâtiments et ainsi, perturber le trafic et l'exploitation de l'aéroport.

5.7.2 - Cas de la neige

La **diminution du nombre de jours de chutes de neige** devrait **améliorer** l'exploitation des aéroports, via la diminution d'interruption de trafic et / ou de retard dus aux mauvaises conditions météorologiques. Les événements météorologiques de l'hiver 2010 / 2011 illustrent les impacts dus aux chutes de neige importantes. Ces aléas ont parfois significativement perturbé l'organisation des aéroports franciliens, comme l'aéroport de Roissy-Charles de Gaulle.

5.7.3 - Sécheresse

Les périodes de **sécheresse** peuvent, sur des sols argileux, induire un retrait gonflement néfaste pour les structures des bâtiments (aérogares, tours) et les chaussées aéronautiques et ainsi, engendrer des dégâts pérennes (chapitre 4.2).

5.8 - Sur les installations de transport par câbles

Les transports à câbles sont des systèmes peu sensibles aux précipitations. Toutefois, une augmentation des précipitations prolongées et / ou intenses pourraient entraîner l'extension des zones soumises à glissement de terrain et donc, des risques de ruine induits sur les infrastructures de type pylônes ou gares. Aucun exemple n'est cependant connu à ce jour.

6 - Impacts des évolutions du vent

6.1 - Sur les infrastructures routières

Les vents forts peuvent menacer la **gestion du trafic** ainsi que la fiabilité et la **sécurité des transports** au niveau des tronçons exposés. Les équipements installés sur les réseaux routiers : dispositifs d'éclairage, murs anti-bruit, signalisation verticale fixe et dynamique (panneaux, PPHM, etc.) sont vulnérables en cas de vents forts ainsi que, pour certains, par fatigue. La vitesse du vent est prise en compte dans leur dimensionnement : une augmentation de cette vitesse pourrait provoquer leur chute et entraîner divers problèmes de sécurité.

Ils font cependant l'objet de renouvellements périodiques suffisamment fréquents pour que la variation progressive des paramètres de vent soit peu perceptible pendant leur durée de vie. Par contre, si le changement climatique s'accompagne de phénomènes extrêmes de forte intensité ou plus fréquents, les risques pour la sécurité des usagers seront importants, d'autant plus que les routes sont dotées d'un très grand nombre de ces équipements.

De plus, le vent peut entraîner des problèmes d'insécurité pour les véhicules ayant une prise au vent importante (poids lourds, bus, caravanes), ainsi que pour des véhicules plus légers de type deux-roues. Le vent peut ainsi causer des déportations de véhicules, des pertes de contrôle pour les conducteurs, des accidents...

Enfin, un vent fort associé à des chutes de neige peut générer des problèmes d'exploitation et des risques d'insécurité.

6.2 - Sur les ouvrages en terre

Aucun impact dû à une modification du régime des vents sur les ouvrages en terre n'a été identifié à ce jour.

6.3 - Sur les ouvrages d'art

6.3.1 - Impacts potentiels sur les structures

Les ouvrages potentiellement les plus sensibles aux évolutions des régimes de vents sont les **ponts suspendus** et les **ponts à haubans**. Ce type d'ouvrages est peu représenté dans le patrimoine français. Pour ces ouvrages, deux phénomènes doivent être pris en compte : les risques d'instabilités aéroélastiques et ceux liés à l'augmentation des vitesses moyennes de vent et de la turbulence.

Les règles de conception et de calculs permettent de prendre en compte les efforts de vent sur les ponts, ainsi que leur comportement aérodynamique. En ce qui concerne le risque d'instabilité aérodynamique, les vitesses critiques d'instabilités sont très élevées (au-delà de 250 km/h) : une évolution des régimes de vent aurait donc peu d'impacts. La faible augmentation prévue des vitesses de vent maximales a également un impact très limité sur le dimensionnement d'ensemble sous chargement statique, à l'exception peut-être de quelques éléments structuraux comme les câbles ou suspentes. Les incertitudes sur l'évolution de la turbulence ne permettent pas d'apprécier l'impact à ce jour.

6.3.2 - Impacts potentiels sur l'exploitation

La **circulation** des véhicules est dangereuse par vent fort. Cette situation est plus fréquente sur les ponts que sur les autres sections de la route, puisqu'ils sont généralement situés dans un environnement plus ouvert. Cela concerne surtout les très grands ponts, qui sont cependant équipés de dispositifs brise-vents et font l'objet de règles d'exploitation spécifique.

6.3.3 - Impact des événements extrêmes

Pour ce qui concerne les valeurs extrêmes de vent, il faut distinguer le franchissement d'un niveau de la durée de franchissement de ce niveau. Cette durée impacte de manière significative par exemple le nombre de cycles de fatigue sur certaines parties d'ouvrages, ou se traduit par une perte de confort (passerelles).

Les phénomènes tropicaux (cyclones ...) extrêmes sont susceptibles de causer des dommages aux ouvrages. Les vents violents et surtout les fortes précipitations peuvent avoir sur les ouvrages exposés des effets graves, voire provoquer leur ruine.

Il est difficile de se prémunir systématiquement contre de tels effets avec des solutions techniques raisonnables par rapport aux risques. Les hypothèses retenues pour les cyclones – c'est-à-dire : une diminution de leur fréquence et une augmentation de leur intensité – rendent plus complexe encore la définition des mesures pertinentes ainsi que la part à affecter au changement climatique.

6.4 - Dans le domaine ferré

6.4.1 - Vents violents

Objet ferroviaire : voie

Les conséquences de vents violents sur la voie sont limitées. La surveillance de la géométrie par des engins spéciaux est effectuée lors de tournées programmées. Une surveillance spécifique de la géométrie peut avoir lieu sur les zones impactées par un vent violent, notamment les zones en remblais, qui constituent un obstacle au vent. Des limitations temporaires de vitesse sont déclenchées au cas par cas après les tournées de surveillance.

Objet ferroviaire : systèmes caténaire

Il existe 12 types de poteaux caténaires. À ce jour, il n'y a aucun exemple connu de support défaillant suite à un événement de vent violent. L'arrêté interministériel (AI) du 17/05/2001 [25] fixe la résistance à 1200 Pa sur une surface plane et 720 Pa sur une surface cylindrique, soit environ 160 km/h. Il fixe également le seuil de dimensionnement des supports à 1,8 fois la limite élastique du matériau. Le support caténaire peut être fragilisé par la corrosion, qui est un facteur aggravant. L'état des supports caténaire est donc surveillé, notamment en pied de poteau.

De plus, la portée caténaire (distance longitudinale entre deux supports) maximale utilisée sur de nombreux tronçons a été dimensionnée par le passé à partir d'un vent inférieur à celui issu de l'AI du 17/05/2001 [25]. Il s'agit d'un vent, dit de rafale, issu du règlement neige et vent. Au-delà de ce vent, en exploitation, il existe un risque fort de décrochement pantographe en milieu de portée maximale : la caténaire n'est plus au droit du pantographe.

Impact sur la circulation et la sécurité

Le système de détection de vents latéraux a pour fonction de détecter des vents dont les caractéristiques (vitesses et directions) risquent de provoquer le renversement des circulations à grande vitesse, en certains endroits sensibles des lignes à grandes vitesses où il est installé.

L'architecture retenue pour le système de détection de vents latéraux (DVL) est une architecture en redondance massive. Les communications ainsi que chaque équipement composant le système sont organisés en 2 voies (A et B). Chaque voie du poste de mesure communique avec une unité de traitement – UT : UTA pour la voie A, UTB pour la voie B – du poste de traitement par l'intermédiaire d'une ligne téléphonique spécialisée. Chaque poste de traitement acquiert les mesures de vent mises à disposition par le poste de mesure. En se basant sur ces mesures, il calcule et émet des alertes et alarmes « vent » (consignes de vitesse) à destination du système appelé : « Système Enclenchement Intégré ». Les UT communiquent avec le poste central situé au poste de commande à distance par deux artères de communications MIC A et MIC B.

Un poste d'affichage est installé à Paris dans les locaux des services en charge des circulations ferroviaires. Il est constitué d'un poste de commandement qui contient une application de supervision. Il

permet de visualiser le fonctionnement des DVL de la ligne à l'identique du poste central DVL des postes de commande à distance, mais ne possède pas de fonctions « télécommandes ».

Par ailleurs, les déflecteurs permettent d'éviter un impact du vent sur les circulations à grande vitesse (figures 23 et 24).



Figure 23 : Rame TGV franchissant le viaduc des Angles vers Avignon.
Source : SNCF Médiathèque, Christophe Recoura.

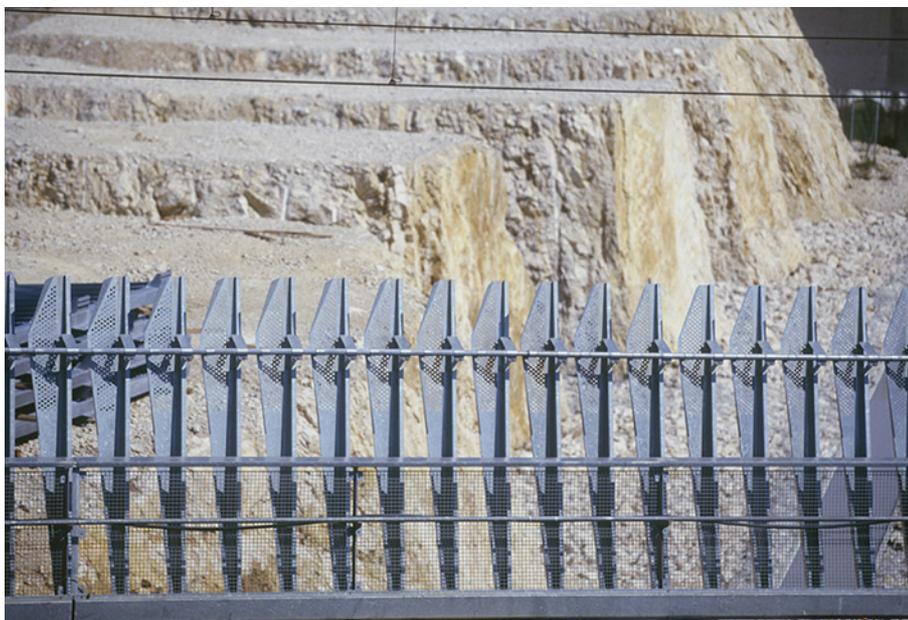


Figure 24 : Déflecteurs installés sur le viaduc des Angles sur la ligne à grande vitesse TGV Méditerranée. Source : SNCF Médiathèque, Jean-Jacques D'Angelo.

Exemple d'impacts dus à des vents violents

Au Nord-Ouest de Narbonne, la voie ferrée vers Carcassonne traverse la plaine alluviale de l'Orbieu sur un remblai qui peut atteindre jusqu'à 6 mètres. Lors de la tempête des 11 au 13 novembre 1999, le remblai a été emporté, la voie affouillée et retournée, les installations caténaïres arrachées. La locomotive d'un train de fret a déraillé et la submersion a atteint le niveau de la voie sur le viaduc de l'Orbieu. La circulation des trains a été interrompue 14 jours. La même tempête, vue du côté maritime, a provoqué une surcote du niveau de la mer de 1,30 mètre à Port-Vendres et une houle significative de 6 mètres à Sète [26].

Cas des tramways et métros

En tramway, les vents violents peuvent impacter l'environnement urbain direct en causant des chutes de branches d'arbres ou de mobilier urbain sur les plate-formes. Les règlements de sécurité et d'exploitation définissent les limites de vents acceptables pour l'exploitation.

Les systèmes métros sont pratiquement insensibles au vent. Toutefois, pour les portions de réseau en surface, il existe un risque de chute d'arbres, de mobilier urbain ou d'objets déplacés par le vent.

6.4.2 - Événement : vents chargés d'air salin

Objet ferroviaire : voie

L'air chargé de sable pollue lentement la plate-forme et diminue la durée de vie globale de la voie. Il faut procéder à un renouvellement plus fréquent du ballast et à un nivellement de la voie. Contre l'aspect salin, en mesure préventive, un lavage de la voie par train spécial peut être réalisé.

Les voies équipées de circuit de voie sont susceptibles d'être impactées : des limitations temporaires de vitesse avec relevé des dérangements peuvent être mis en place.

Objet ferroviaire : système caténaire

Les lignes électrifiées comportent des supports galvanisés à chaud (norme NF EN ISO 1461 [27]), ou peints. Des piqûres de rouille peuvent apparaître et leur évolution dans le temps doit être surveillée lors de tournées des équipes de maintenance à titre préventif.

6.5 - Dans le domaine fluvial

En cas de modification du régime de vents, en **direction et en vitesse**, des largeurs navigables plus importantes pourraient être nécessaires pour assurer la sécurité de **manœuvre des bateaux**. L'augmentation des vitesses de vent peut provoquer la chute des équipements installés le long des voies navigables : éclairages, signalisation verticale fixe, etc., et entraîner des problèmes de sécurité. Enfin, les voies navigables sont souvent bordées d'arbres, ces arbres parfois vieillissant sont vulnérables aux augmentations des vitesses de vent.

6.6 - Sur les infrastructures portuaires et maritimes

La modification du régime de vents, notamment en **direction** pourrait perturber les **accès aux ports**. En effet, les chenaux d'accès sont généralement orientés en fonction des vents dominants pour éviter les vents latéraux et ainsi, faciliter les manœuvres des navires.

Une augmentation de l'intensité des vents peut entraîner, via les descentes de charge des portiques, des efforts plus importants sur les quais et donc des instabilités, voire des effondrements de quais dans les cas extrêmes.

Les fortes tempêtes perturbent l'exploitation, car l'outillage portuaire : portiques, grues, etc., doit être arrêté ou fonctionner en mode dégradé.

6.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires

Une modification importante, fréquente ou définitive des vents dominants pourrait rendre certaines pistes inutilisables, de façon temporaire ou définitive, du fait de leur orientation non adaptée aux nouveaux vents.

Les manœuvres d’atterrissage ou de décollage deviennent difficiles, voire dangereuses, lorsque la composante du vent au sol transversalement à l’axe de la piste (vent traversier – VT) dépasse une certaine valeur. Cette valeur se calcule suivant le schéma ci-dessous (figure 25), où VT est la valeur du vent traversier maximal acceptable.

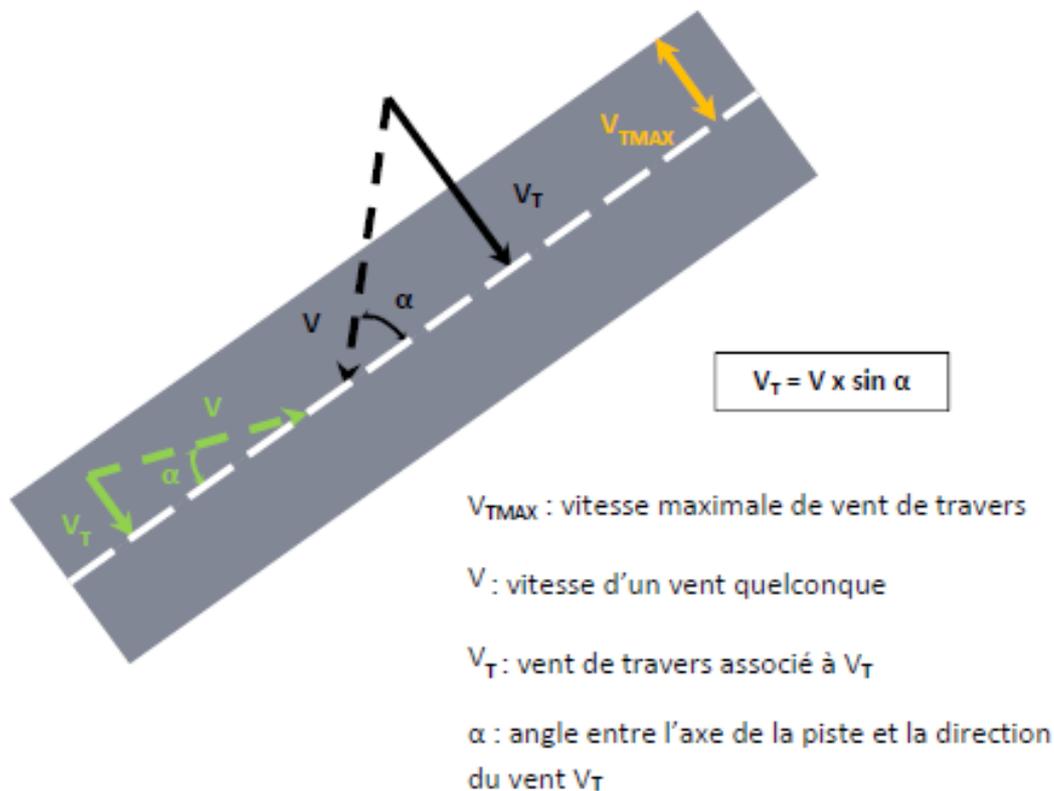


Figure 25 : Calcul de la valeur du vent traversier. Source : STAC.

Par ailleurs, les vents violents et les tempêtes ont des conséquences sur l’exploitation des aéroports : certains aéroports sont contraints de fermer en cas de tempêtes. En Outre-Mer, les tempêtes tropicales et cyclones entraînent des fermetures d’aéroports, isolant bien souvent ces territoires du reste de la métropole. De plus, en cas de dégâts sur l’aéroport, sa fermeture prolongée empêche l’arrivée rapide des secours.

Par temps de vent, le risque de présence de FOD (débris : Foreign Object Debris) sur les aires de manœuvre est plus important et impacte la sécurité des vols.

6.8 - Sur les installations de transport par câble

La notion de vents violents est intégrée historiquement à la conception des systèmes et prise en compte pour l’exploitation. Des anémomètres avec renvoi d’information en gare sont installés sur l’ensemble des appareils de type téléportés (les plus sensibles aux vents). Des consignes d’exploitations spécifiques sont associées à des seuils : marche lente ou arrêt de l’appareil.

Une augmentation de la fréquence des vents violents n'impacterait vraisemblablement pas la sécurité des systèmes, mais aurait un impact sur leur disponibilité.

7 - Impacts d'une évolution du niveau des mers et modification du climat de houle

7.1 - Sur les infrastructures routières

Certaines parties d'infrastructures routières de faible altitude ou situées en zones côtières pourraient être concernées par des risques de submersion marine générant une diminution des durées de vie des infrastructures ainsi que des ruptures provisoires ou définitives de réseau. Une étude de vulnérabilité simplifiée des infrastructures de transport terrestre face au risque de submersion a été menée en 2009 [28].

Ces événements de submersion marine pourraient nécessiter soit la protection des infrastructures, soit la création d'itinéraires alternatifs.

Le rapport sur les coûts des impacts dus au changement climatique [29] précise : « la remontée d'ensemble du niveau de la mer d'1 mètre représenterait un coût patrimonial, pour les routes nationales métropolitaines (hors autoroutes, hors autres voiries), hors pertes d'usage, pouvant aller jusqu'à 2 000M€ ». Ce montant s'entend hors effet « réseau » : par exemple, la submersion d'un tronçon limité de route peut entraîner l'indisponibilité de toute une section mais seule la valeur patrimoniale du tronçon submergé a été calculée.

7.2 - Sur les ouvrages en terre

La plupart des ouvrages en terre actuellement hors d'eau a été construit il y a une vingtaine d'années au moins. Leur dimensionnement et leur mode de construction n'ont pas tenu compte du fait que la base du remblai serait sous le niveau de la mer, ce qui peut entraîner des problèmes d'affouillement, de rupture de talus, brèche... Ces problèmes pourraient être intensifiés par l'effet de la houle et de la marée.

L'augmentation de l'occurrence de submersions induit l'accroissement de **ruptures par surverse**, risque contre lequel les **digues** ne sont quasiment jamais protégées.

7.3 - Sur les ouvrages d'art

7.3.1 - Tendances climatiques significatives retenues pour les ouvrages d'art

Une augmentation de plus de 1 m du niveau marin rendra les problématiques de réorganisation du territoire et d'occupation des sols primordiales par rapport à celle des ouvrages d'arts.

7.3.2 - Impacts potentiels sur les ouvrages d'art

La montée du niveau des mers aura différents effets : des **ouvrages** (ponts et murs) **actuellement en rivièr**e se trouveront exposés à des **eaux saumâtres** ainsi qu'à **des modifications des courants** autour de leurs appuis et fondations.

Les chlorures de l'eau de mer et les embruns sont des **facteurs de corrosion** des bétons armés des ouvrages ; la modification des conditions de courant favorise les **affouillements** et donc l'intégrité et la stabilité des ouvrages qui y sont exposés.

Les **ouvrages routiers** concernés par la surcote marine ne sont **pas très nombreux** ; une attention particulière est toutefois à porter au dénombrement des **ouvrages de soutènement sensibles**.

Enfin, le **gabarit hydraulique** de tous les ponts sera réduit de la hauteur résiduelle de la surcote marine au droit de ces ouvrages.

7.4 - Dans le domaine ferré

Le phénomène considéré ici est à comprendre au sens large : submersion marine, phénomènes de crues – rivières, fleuves. En effet, la desserte ferroviaire peut être exposée à des risques qui diffèrent dans leur nature, mais ont des origines proches ou comparables et s'entrecroisent parfois dans l'espace et le temps : par exemple, des événements extrêmes d'origine continentale et d'origine marine peuvent se produire simultanément.

Les impacts dus à ces phénomènes sont en lien avec la technologie ferroviaire de la sécurité des installations. L'eau élimine le graissage des éléments mobiles des appareils de voie, accélère leur vieillissement ou encore, perturbe le fonctionnement des moteurs d'aiguille. Des mesures préventives ou correctrices sont alors mises en œuvre : renforcement des graissages périodiques des installations, surveillance de la tenue des massifs de supports caténaire en cas de glissement de terrain en zone de fort déblai, etc.

Une faible augmentation du niveau moyen de la mer peut faire progresser significativement le biseau salé vers l'intérieur des terres. Ceci impacterait la maintenance des systèmes de pompage permanents pour le rabattement de la nappe au droit des passages souterrains le long des côtes : ces systèmes sont conçus pour pomper de l'eau douce. De plus, les bétons utilisés pour les ouvrages souterrains ne sont pas adaptés au contact avec de l'eau salée ou saumâtre.

En outre, des problèmes sur l'infrastructure proprement dite peuvent apparaître.

Enfin, le niveau des surcotes permet de supposer des effets de submersion aggravés, côté mer, par l'effet de la houle, et côté étangs et plaines inondables, par la concomitance des tempêtes marines et continentales.

Les systèmes TG sont, en raison de leurs positionnements géographiques, peu sensibles au phénomène d'évolution du niveau des mers. Toutefois, les tramways de Montpellier et de Nice pourraient être impactés sur des secteurs très ponctuels. Certains coups de mer pourraient endommager la plate-forme ferroviaire du chemin de fer secondaire de la Balagne en Corse. Des tournées de voie et de faibles vitesses permettent d'éviter les accidents. Le sous-système voie requière une attention particulière en milieu exposé aux éléments marins.

7.5 - Dans le domaine fluvial

Une élévation du niveau marin pourrait entraîner une modification de la hauteur d'eau aux embouchures des fleuves et canaux et donc, modification de l'écoulement en amont (trait d'eau), impactant ainsi l'exploitation.

7.6 - Sur les infrastructures portuaires et maritimes

L'élévation du niveau des océans se traduira, pour les infrastructures portuaires, par une réduction de leur opérabilité et de leurs performances sur quasiment tous les aspects, qu'il s'agisse d'agitation portuaire, de disponibilité des équipements ou de stabilité des structures.

Tout d'abord, une augmentation du niveau des océans entraînerait, lors de la propagation des houles du large vers les zones d'implantation des ports, une atténuation des phénomènes de déferlement et de frottement sur le fond marin. Ceux-ci dépendent en effet directement de la profondeur. L'intensité des houles à l'entrée des ports et de celles affectant les ouvrages extérieurs de protection serait ainsi renforcée. Cette augmentation générale des hauteurs de houles sera d'autant plus marquée que les ports sont implantés en faible profondeur.

Un accroissement concomitant du niveau d'eau et de la hauteur des vagues aura pour conséquence une augmentation des dommages sur les ouvrages de protection et des franchissements de vagues plus fréquents au-dessus de ces ouvrages. Or, les franchissements sont susceptibles de renforcer le niveau d'agitation des bassins situés en arrière des ouvrages. De même, lorsque l'ouvrage de protection intègre, directement dans sa partie arrière, des postes à quai, les conditions d'exploitation de cet ouvrage intérieur

pourront se voir affectées significativement par les franchissements, avec des réductions du taux de disponibilité des postes.

Enfin, outre l'accroissement de l'intensité des houles à l'entrée du port, l'augmentation du niveau d'eau signifiera en règle générale, une diminution de l'abri offert par l'infrastructure. En effet, l'atténuation des houles à l'intérieur des ports est principalement obtenu par diffraction autour des ouvrages et des contours intérieurs du port. Le niveau de l'atténuation dépend de la longueur d'onde des vagues. Or, une augmentation de la profondeur due à une élévation du niveau de la mer conduit à un accroissement de la longueur d'onde et donc à une diffraction moins efficace. Ceci génère une augmentation générale de l'agitation à l'intérieur du port. Les conséquences seront multiples : baisse de la disponibilité des postes à quai, efforts accrus sur les amarres, mouvements plus importants des bateaux avec les éventuels problèmes de sécurité correspondants. De plus, l'augmentation du niveau de l'agitation interne du port peut également affecter la stabilité des structures soumises aux vagues (dommages plus fréquents et plus marqués).

Exemple d'impacts dus à des submersions marines

Entre le 27 février et le 28 février 2010, la tempête Xynthia a balayé la France. Elle y a généré un épisode de vents violents, une onde de tempête et, avec la conjoncture de fortes marées (coefficient : 102) et de la pleine mer quasi-simultanée, une brutale et très forte submersion marine sur les départements de Charente-Maritime et de Vendée. Celle-ci a entraîné le décès d'une cinquantaine de personnes. Cet épisode et en particulier, la forte surcote générée (près de 1,5 mètre) donne une idée des conséquences que pourrait engendrer la hausse du niveau de la mer : submersion marine, destruction des ouvrages de protection, pertes humaines, dégâts dans les ports et sur les voies ferrées littorales.

7.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires

Certains éléments de l'infrastructure de transport aérien peuvent être vulnérables à une élévation du niveau de la mer. Une élévation du niveau marin pourrait nécessiter un surcroît de protection ou la relocalisation de certaines des installations menacées, notamment dans les territoires d'outre-mer plus exposés. En Polynésie-Française en particulier, la plupart des pistes ont été construites sur les platiers récifaux et ont une côte voisine de +2 à +3 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer.

Les aéroports potentiellement vulnérables et situés dans des zones à risque doivent être identifiés. L'étude de quelques situations insulaires extrêmes peut donner un aperçu des situations actuelles les plus critiques provoquées par le changement climatique. Les impacts avérés ou attendus à court terme peuvent être catastrophiques, notamment lorsqu'ils engendrent la disparition de l'espace terrestre par submersion.

8 - Impacts d'une évolution de la biodiversité

8.1 - Sur les infrastructures routières

Pour le siècle à venir, l'évolution de la biodiversité pourra induire des **entretiens de l'aménagement paysager plus fréquents** ou différents, notamment si les gestionnaires doivent faire face à une prolifération d'espèces invasives.

Les évolutions climatiques pourraient modifier les aires de répartition des espèces de faune et de flore et ainsi, générer des déplacements des corridors écologiques : une adaptation des infrastructures routières existantes pourrait alors être nécessaire. De même, ces nouveaux corridors devraient être pris en compte lors d'études portant sur des infrastructures nouvelles, afin de permettre les migrations des espèces.

Dans les zones inter-tropicales des DOM-COM, le changement climatique aura une incidence indirecte sur les ouvrages de protection des routes littorales, via la dégradation estimée des récifs coralliens et des écosystèmes associés, notamment les mangroves. Ces écosystèmes ont un rôle non négligeable de protection du littoral. Ils diminuent fortement l'énergie de la houle au rivage : un massif corallien peut absorber jusqu'à 90 % de la force d'impact d'une vague. Par ailleurs, la dégradation mécanique et chimique des mangroves pourrait diminuer fortement l'importance de leurs zones de présence et en conséquence, leur effet de protection pour les littoraux et infrastructures littorales localisées en amont. Des études ont montré que les racines et les branches des mangroves peuvent diminuer de 75 % l'énergie d'une vague lorsque celle-ci traverse 200 mètres de mangroves.

8.2 - Sur les ouvrages en terre

Aucun impact dû à une évolution de la biodiversité sur les ouvrages en terre n'a été identifié à ce jour.

8.3 - Sur les ouvrages d'art

Aucun impact dû à une évolution de la biodiversité sur les ouvrages d'art n'a été identifié à ce jour.

8.4 - Dans le domaine ferré

Actuellement, des études sont en cours sur le Réseau Ferré National pour déterminer le rôle de refuge ou d'habitat des abords de voies. Ce paramètre aura probablement des conséquences à terme sur l'entretien de l'infrastructure (abords de voies ...).

8.5 - Dans le domaine fluvial

Une évolution de la biodiversité pourra induire des entretiens plus fréquents des voies navigables et berges associées et plus particulièrement, des espèces envahissantes. Du fait des déplacements des corridors écologiques ou des modifications des aires de répartition des espèces, une adaptation des ouvrages de continuité écologique (dont les passes à poissons) pourrait être nécessaire.

8.6 - Sur les infrastructures portuaires

Aucun impact dû à une évolution de la biodiversité sur les infrastructures portuaires n'a été identifié à ce jour.

8.7 - Sur les infrastructures aéroportuaires

8.7.1 - Impacts

Dans les zones inter-tropicales des DOM-COM, de même que pour les infrastructures routières (chapitre 8.1), la dégradation attendue des récifs coralliens et écosystèmes associés, via son incidence sur les ouvrages de protection du littoral, peut impacter les infrastructures aéroportuaires. C'est en particulier le cas en Polynésie-Française, où la majeure partie des pistes sont construites sur des platiers récifaux.

L'évolution des populations de certaines **espèces d'oiseaux migrateurs et notamment**, la modification de leurs aires de répartition, avec la sédentarisation de certaines espèces ou encore, la baisse de la mortalité hivernale pourrait accroître le **risque de collision oiseaux / aéronef aux abords des aérodrômes**.

À titre d'exemple, la présence plus importante que par le passé de campagnols attire les rapaces sur de nombreux aéroports. Ceci peut expliquer le grand nombre de collisions « rapaces / aéronefs ».

Les collisions avec des oiseaux engendrent en effet des dommages matériels, qui peuvent aller d'une simple déformation du bord d'attaque de l'aile à la destruction partielle ou totale du réacteur. Les collisions entraînent également des dommages à l'exploitation, notamment des retards suite à : une accélération-arrêt, un demi-tour, un examen détaillé des moteurs, une réparation...

En cas d'ingestion d'oiseaux, les causes les plus fréquentes d'accidents sont une panne « moteur » ou encore, une accélération-arrêt suivie d'une sortie de piste.

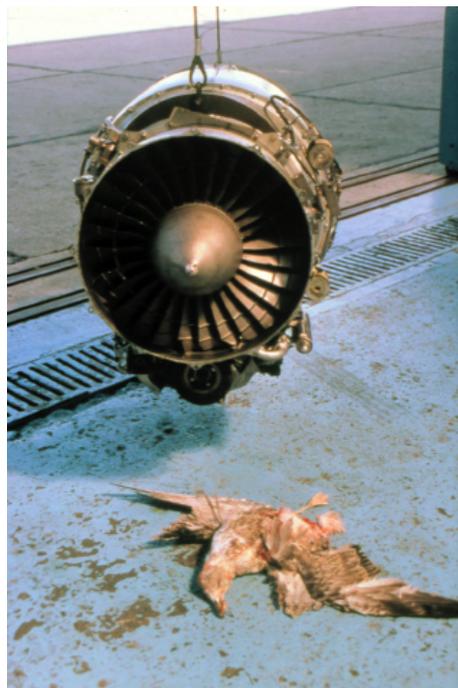


Figure 26 : Dommage sur un Airbus suite à une collision aviaire. Source : STAC.

Les dommages causés par les oiseaux peuvent être graves et engendrer des dépenses très importantes (jusqu'à plusieurs millions d'euros).

Exemple d'impacts dus à des submersions marines

Le péril animalier est un enjeu important pour les exploitants aéroportuaires et les aéronefs. Depuis 1912, 90 avions civils ont été perdus dans le monde, occasionnant plus de 300 victimes. Parmi les 765 incidents annuels enregistrés en moyenne sur les aéroports français, 8,5% sont classés comme sérieux et 4,6% causent des dégâts. L'objectif est de réduire le nombre de collision entre les animaux (essentiellement les oiseaux et les mammifères) et les avions sur les aéroports. L'exemple suivant est caractéristique des conséquences du péril aviaire : le 14 août 2013, sur l'aéroport de Montpellier, l'un des deux moteurs d'un Airbus A320 a ingéré une mouette rieuse lors du décollage (figure 26), obligeant l'appareil à faire demi-tour et à réaliser un atterrissage d'urgence avec un seul moteur fonctionnant.

Les statistiques établies en France au cours des deux dernières années, portant sur environ 1000 rencontres d'oiseaux, montrent que les rapaces diurnes sont à l'origine du plus grand nombre de collisions avec les avions (33 % des cas). Le faucon crécerelle, la buse variable et le milan noir sont impliqués dans 300 incidents durant cette période. Le taux de collisions avec ces oiseaux pour 10 000 mouvements d'avions, a doublé au cours des dix dernières années. Les mouettes et goélands viennent en deuxième position avec 19 % des cas.

La diminution globale des collisions entre animaux et avions observée ces dernières années est liée aux actions d'effarouchement bien adaptées sur les aérodromes par les équipes chargées de la lutte aviaire. La proportion d'incidents avec les vanneaux dépend de la rigueur de l'hiver : elle fluctue entre 9 et 12 % des cas selon les années. Même si la proportion de rencontres avec les hirondelles et les martinets reste élevée (13 % des cas), ces incidents n'entraînent le plus souvent aucun dommage significatif sur les avions, compte tenu de la faible masse des oiseaux. Par contre, les collisions avec les pigeons, les perdrix, et les faisans occasionnent une fois sur trois des dommages sérieux sur les appareils : ces oiseaux « denses » sont dangereux. Les corvidés ne représentent que 3 % des impacts, qui ont lieu surtout en juillet-août, au moment de l'envol des jeunes et par temps de brouillard [30].

9 - Tableau de synthèse des impacts potentiels des évolutions climatiques par type d'infrastructure

	Températures				Précipitations		Élévation du niveau de la mer et augmentation des fortes houles	Modification des régimes de vents	Sécheresse	Évolution de la biodiversité
	Augmentation de la température moyenne	Augmentation des températures maximales	Diminution du nombre de jours de gel	Cycles de gel / dégel	Nombre de jours de neige	Augmentation de l'intensité des précipitations « extrêmes »				
Routes	Construction : effet qualitativement favorable Déformation des enduits	Déformation des enduits, orniérage, fluage, ressuage, pertes d'adhérence Problèmes de sécurité dus aux incendies de forêt : gêne pour la visibilité et coupures d'axes	Réduction des interventions de VH		Réduction des interventions de VH	Sécurité routière : risques d'aquaplanage Augmentation du nombre de jours de dépassement de capacité des réseaux d'assainissement Ruptures de réseau	Risque de déstabilisation des protections en enrochement et des structures de chaussées Inondations	Équipements de la route vulnérables Problèmes de sécurité pour les usagers selon leur prise au vent	En zones argileuses, fissuration des chaussées	Entretien des aménagements paysagers plus fréquent Déplacements des corridors écologiques Dom-Com : augmentation des risques de submersion et de dégradation des infrastructures littorales liée à la dégradation probable des massifs coralliens et mangroves

	Températures				Précipitations		Élévation du niveau de la mer et augmentation des fortes houles	Modification des régimes de vents	Sécheresse	Évolution de la biodiversité
	Augmentation de la température moyenne	Augmentation des températures maximales	Diminution du nombre de jours de gel	Cycles de gel / dégel	Nombre de jours de neige	Augmentation de l'intensité des précipitations « extrêmes »				
Ouvrages en terre	Retrait / gonflement des argiles : fissuration en « remontée de chaussée »	Retrait / gonflement des argiles : fissuration en « remontée de chaussée »				Fréquence des ruptures de pentes accrue (érosion, instabilité, dégradation) Effondrements, chutes de blocs, glissements, coulées boueuses Affouillements des OA et des parties inférieures des remblais, voire possibilité de déstabilisation du remblai	Problèmes d'affouillement, brèche, rupture de talus Avec l'augmentation de l'occurrence des submersions : accroissement de ruptures par surverse		Retrait / gonflement	
Ponts et murs	Effets non significatifs sur la dilatation thermique (vigilance cependant pour les ponts intégraux) Effets d'auto-contrainte à analyser pour les sections à multiples expositions et hyperstatiques	Impact sur la mise en œuvre des matériaux (béton) Risque accru de fragilité des aciers anciens par grand froid	Effet positif sur la durabilité	Évolutions non correctement identifiées dans les scénarios	Effet positif sur la durabilité	Risque accru d'affouillement des fondations des ponts et des murs de soutènement situés en zone inondable Risque accru de carbonatation ou de pénétration de chlorures par augmentation des cycles d'humidification / séchage	Exposition accrue à des eaux saumâtres, modification des courants autour de leurs appuis Gabarit hydraulique réduit	Absence d'impacts significatifs (vigilance cependant nécessaire pour certains éléments structuraux légers et vis-à-vis de phénomènes transitoires extrêmes)	Risque de tassements accrus	

	Températures				Précipitations		Élévation du niveau de la mer et augmentation des fortes houles	Modification des régimes de vents	Sécheresse	Évolution de la biodiversité
	Augmentation de la température moyenne	Augmentation des températures maximales	Diminution du nombre de jours de gel	Cycles de gel / dégel	Nombre de jours de neige	Augmentation de l'intensité des précipitations « extrêmes »				
Infrastructures ferroviaires – Rail		Augmentation des contraintes dans le rail : risque de déformation (canicule) ou de rupture du rail (froid) Dysfonctionnement des appareils de coupure Risque de surchauffe des câbles en période de canicule		Risque de rupture du rail Blocage de la manœuvre des aiguilles des appareils de voie	Risque de rupture du rail Blocage de la manœuvre des aiguilles des appareils de voie	Glissements de terrain / inondations : perturbation du fonctionnement des équipements électroniques, des circuits de voie Accélération de la corrosion du rail Déformation la géométrie de la voie... Les coulées de boue constituent un obstacle aux circulations Dysfonctionnement des appareils de coupure en cas de pluie ou de crues exceptionnelles	Dégradation des OA	Vents exceptionnels : désaxement de portée adapté aux pantographes Vents forts : risque par rapport aux équipements électriques extérieurs Tempête d'air salin : perturbation possible du fonctionnement des circuits de voie	Rétractation des argiles	
Infrastructures ferroviaires – Systèmes caténares		Dysfonctionnement des appareils de coupure		Usure du fil conducteur, les isolateurs deviennent passants		Inondation (pluie ou crue exceptionnelle) : dysfonctionnement des appareils de coupure		Vents exceptionnels : désaxement de portée adapté aux pantographes		
Infrastructures ferroviaires – Sous-stations		Risque de surchauffe des câbles en période de canicule						Vents forts : risque par rapport aux équipements électriques extérieurs		

	Températures				Précipitations		Élévation du niveau de la mer et augmentation des fortes houles	Modification des régimes de vents	Sécheresse	Évolution de la biodiversité
	Augmentation de la température moyenne	Augmentation des températures maximales	Diminution du nombre de jours de gel	Cycles de gel / dégel	Nombre de jours de neige	Augmentation de l'intensité des précipitations « extrêmes »				
Fluviales	Obstruction des voies navigables par un bouchon algueux générant un frein hydraulique	Dysfonctionnement potentiel des systèmes d'automatisation	Bénéfique à l'exploitation du réseau			Crues plus importantes impactant la navigation, l'entretien et les ouvrages		Gêne des manœuvres des bateaux Chute des équipements (éclairage, signalisation) et d'arbres	Augmentation des coûts d'exploitation et de transport	Entretiens plus fréquents des voies navigables et berges Modification des ouvrages de continuité écologique
Portuaires	Impact mineur sur les différentes infrastructures	Dilatation possible des rails des différents portiques				Perturbation possible, lors des épisodes de pluies fortes, de l'exploitation des terminaux Problèmes d'instabilité des ouvrages de soutènement par remontée de nappe	Augmentation des hauteurs de houle lors d'événements de tempêtes : dommages plus importants sur les ouvrages de protection (dommage, érosion) et mouvements sédimentaires Augmentation du niveau de la mer : augmentation du climat de houle, conditions de franchissement plus importantes	En direction : perturbation des accès aux ports En intensité : perturbation de l'exploitation portuaire et instabilité des quais	Impacts mineurs	

	Températures				Précipitations		Élévation du niveau de la mer et augmentation des fortes houles	Modification des régimes de vents	Sécheresse	Évolution de la biodiversité
	Augmentation de la température moyenne	Augmentation des températures maximales	Diminution du nombre de jours de gel	Cycles de gel / dégel	Nombre de jours de neige	Augmentation de l'intensité des précipitations « extrêmes »				
Aéronautiques	Distances de décollage augmentées, mais à priori, ne devrait pas poser de problème	Impact identique à celui lié à une augmentation de la température moyenne	Moins d'interruption de trafic et / ou de retard Moins d'usage de glycol (moins de pollution)		Moins d'interruption de trafic et / ou de retard Moins d'usage de glycol (moins de pollution)	Inondations de pistes ou de bâtiments	Augmentation des risques de submersion et de dégradation des infrastructures	Possibilité de rendre des pistes inutilisables Vents violents ou tempêtes : problèmes de sécurité	Impacts dus à des phénomènes de retrait / gonflement des argiles Augmentation du nombre de feux de forêts incontrôlés	Évolution du risque de collision oiseaux / aéronef aux abords des aérodromes Dom-Com : augmentation des risques de submersion et de dégradation des infrastructures littorales liée à la dégradation probable des massifs coralliens et mangroves
Câble		Températures extrêmes : perturbation de l'exploitation en lien avec le confort des usagers				Risque accru d'instabilité des sols pouvant entraîner des dégradations sur les structures		Diminution de la disponibilité du système (arrêt) Dégradation de l'infrastructure pour les événements les plus extrêmes		

Tableau 7 : Synthèse des impacts potentiels des évolutions climatiques par type d'infrastructures. Source : Cerema.

Chapitre

Documentation technique de conception, exploitation et entretien des infrastructures de transport potentiellement impactée par le changement climatique

L'analyse précédente des impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures de transport a constitué un travail préparatoire à l'identification des référentiels techniques, normes et textes officiels susceptibles d'être impactés par le changement climatique.

Le présent chapitre expose la méthodologie générale de listing et d'analyse de ces référentiels. Les méthodologies de listing spécifiques à chaque type d'infrastructure sont détaillées en annexe. Les listes de référentiels sont également données en annexe. Elles apportent déjà une première réponse à l'action 1, car les référentiels à adapter y figurent. Le dernier chapitre, relatif aux demandes de projections climatiques, complète cette réponse.

10 - Méthodologie d'analyse des référentiels techniques

10.1 - Méthodologie générale pour l'ensemble des domaines de transport

Au total, plusieurs centaines de documents (plus de 800 pour le seul domaine routier) ont été balayés par types d'infrastructures, pour recenser les référentiels comprenant des paramètres climatiques. Ce recensement a été effectué avec des méthodologies différentes selon les services techniques impliqués.

Les référentiels concernant les infrastructures routières, les ouvrages d'art routiers et les tunnels ont été recensés grâce à des requêtes par mots clefs dans une base de données spécifique : la Documentation Technique Routière Française (DTRF). Les mots clefs utilisés correspondent à des variables climatiques susceptibles d'évoluer. Ces mêmes mots-clés ont été utilisés pour le domaine aéroportuaire, dans un ensemble de documents internationaux, européens et nationaux. Pour chacun de ces domaines (infrastructures routières, ouvrages d'art routiers, tunnels, domaine aéroportuaire), la liste de référentiels a été complétée par les experts. Il n'existe pas de base de données spécifiques aux autres types d'infrastructures. Les services techniques concernés ont alors listé les documents qu'ils utilisent couramment ou qu'ils ont produits. Cette méthode concerne les référentiels ferroviaires, maritimes et fluviaux, ceux spécifiques aux ouvrages urbains et enfin, ceux spécifiques aux remontées mécaniques et transports guidés. Ces listes ont été complétées par des recherches dans diverses bases de données (chapitre 2). Chaque service technique a enfin effectué un tri au cas par cas des documents listés, de sorte à retenir les référentiels :

- comprenant des variables climatiques qui influencent ou non la conception, l'entretien ou l'exploitation des infrastructures concernées (référentiels routiers, liés aux ouvrages maritimes et fluviaux à l'exception pour ce domaine des règlements d'exploitation, spécifiques aux transports guidés) ;
- comprenant des variables climatiques susceptibles d'influencer la conception, l'entretien ou l'exploitation des infrastructures concernées (référentiels spécifiques aux tunnels, liés aux ouvrages d'art routiers, spécifiques aux ouvrages d'art urbains – y compris pour ce domaine les guides traitant de la gestion de crise pouvant être sujet à évolution).

Il convient de noter que les référentiels établis par la profession, mais hors RST, n'ont pas été repris dans ce document.

10.2 - Référentiels identifiés

Les documents issus de l'analyse des référentiels ont été classés en trois catégories définies ci-dessous :

- catégorie 1 : référentiel technique non impacté par le changement climatique, mais abordant des notions climatiques ;
- catégorie 2 : référentiel technique impacté par les évolutions climatiques et nécessitant d'ores et déjà une révision technique (modifications réglementaires, actions de normalisation ...) ;
- catégorie 3 : référentiel technique pour lequel il est indispensable d'obtenir des précisions sur les variables ou paramètres climatiques afin de déterminer s'ils doivent ou non être révisés et de quelle manière.

Les documents recensés ont ensuite été classés selon trois grands thèmes correspondant à la construction, l'entretien et l'exploitation. Pour chaque document listé, on retrouvera le ou les mots-clés qui y sont cités. Ces documents sont disponibles en annexe du rapport.

Chapitre

Projections climatiques nécessaires pour l'adaptation des référentiels

Ce chapitre a pour objectif, suite à l'identification des référentiels susceptibles d'être impactés par le changement climatique, d'établir les demandes de projections climatiques nécessaires à l'adaptation de ces référentiels.

Il expose tout d'abord les différents types de projections climatiques peuvent être demandés, puis précise pour chaque grande catégorie d'infrastructure, les demandes de projections et leur intérêt pour l'adaptation des référentiels.

11 - Précisions sur la manière d'aborder le sujet

11.1 - Précision spatiale ou temporelle ?

Les besoins de précisions sur les variables climatiques peuvent être de différents ordres. Il peut s'agir de précisions de type spatial, car les données actuellement utilisées dans les référentiels pour la conception, l'entretien ou l'exploitation d'infrastructures et systèmes de transport sont insuffisamment détaillées sur le territoire pour prendre en compte les hétérogénéités liées au climat français d'aujourd'hui et de demain. Des précisions temporelles peuvent également être nécessaires, car les données disponibles sur ces paramètres sont actuellement peu disponibles sur des échelles de temps qui permettent de réaliser des statistiques intéressantes. Il est enfin possible de demander des précisions spatio-temporelles le cas échéant.

11.2 - Quelles variables sont concernées par ces demandes de précisions ?

Les variables sur lesquelles des précisions pourront être demandées sont soit des variables existantes dont il serait nécessaire de préciser les échelles spatiale, temporelle ou les deux, soit de nouvelles variables, telles que celles proposées dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel et non citées à ce jour dans les référentiels. Par exemple les amplitudes journalières de température ne sont actuellement pas prises en compte dans les référentiels routiers alors qu'elles pourraient constituer une donnée complémentaire intéressante.

11.3 - Évolution des paramètres météorologiques ou des indicateurs calculés à partir de ces paramètres ?

Il est important de différencier la statistique que l'on peut demander pour un paramètre climatique donné et la définition et le calcul de l'indicateur qui est ou qui sera réalisé par les services compétents dans le domaine, sur la base de cette statistique. Cet indicateur peut être construit, soit à partir d'un ou de plusieurs paramètres météorologiques selon une formule de calcul déterminée, soit se baser sur une étude statistique d'un ou plusieurs paramètres.

Si l'on considère les **indices de gel** utilisés dans la vérification au gel des chaussées lors de leur dimensionnement, il est possible de demander le calcul des indices de gel sur une échelle spatio-temporelle plus fine que celle dont on dispose aujourd'hui dans le catalogue des structures de type de chaussées neuves (une donnée par département en moyenne). Cependant, avec une nouvelle base de données d'indices de gel, il est possible de choisir différents indicateurs qui rentreront en jeu dans les référentiels de dimensionnement :

- l'indice de gel exceptionnel, aujourd'hui défini comme étant le plus fort connus depuis 1951 ;
- l'indice de gel rigoureux non exceptionnel, aujourd'hui défini comme l'indice dont la rigueur revient une fois tous les 10 ans ;
- etc.

C'est alors non pas le paramètre météorologique lui-même qu'il faut faire évoluer dans les référentiels, mais la **définition de l'indicateur réalisé à partir de la base de données complétée**. Ainsi, par exemple, il pourrait être décidé que l'indice de gel exceptionnel est l'indice définissant l'hiver le plus rude sur les trente dernières années glissantes. Cette nouvelle définition, sur une base de données plus précise spatialement, permettrait un dimensionnement plus juste des infrastructures.

Pour certains paramètres, il y aura donc deux étapes dans la révision des référentiels.

L'exemple ci-dessus est également valable si le paramètre météorologique en question est un paramètre directement mesuré, plutôt qu'un paramètre comme l'indice de gel, issu d'un calcul à partir d'un paramètre mesuré qui est en l'occurrence la température.

Les éléments abordés dans cette partie sont valides pour la conception d'infrastructures, mais pas dans les phases de réalisation de ces dernières. En effet, dans le second cas, la météorologie du chantier est telle qu'elle est et il est difficile de jouer dessus. Cependant, une réflexion réalisée par rapport à la phase chantier, pourrait être de s'intéresser à l'influence du changement climatique sur les pratiques actuelles. Ainsi, deux cas de figures pourraient se présenter :

- l'évolution d'un paramètre dans le futur peut se traduire par une modification de la valeur chiffrée de ce paramètre présente dans un référentiel ;
- l'évolution de ce paramètre dans le futur peut affecter la durée pendant laquelle il est possible de réaliser telles ou telles actions.

Par exemple : il est actuellement indiqué dans le Guide de Traitement des Sols – GTS [31] que la température minimale de mise en œuvre d'un matériau traité aux liants hydrauliques est de 5 °C. Si l'on considère que la température va globalement augmenter dans les années à venir, il est fortement probable que les plages de mises en œuvre de ces matériaux soient plus importantes. Ainsi, différents choix s'offrent aux décideurs :

- augmenter la valeur chiffrée de la température citée dans le référentiel pour maintenir un haut niveau de qualité de mise en œuvre des produits utilisés, sans engendrer de contraintes supplémentaires à celles existantes aujourd'hui ;
- augmenter les plages de mises en œuvre de ces produits.

12 - Précisions pour le domaine routier

Face à l'impact du climat et du changement climatique, l'amélioration des référentiels concernant les voiries routières et les voiries urbaines (en première approximation équivalente aux voies routières) semble utile. En effet, ces dernières années, plusieurs constats tendent à montrer que les connaissances sont insuffisantes dans ce domaine et que les pathologies routières sont de plus en plus liées à des problèmes de surface, dus directement à l'impact du climat (liés à la présence d'eau et aux variations de température), ainsi qu'à des problèmes de structure (liés au trafic). De nombreuses variables climatiques font donc l'objet de demandes de précisions, regroupées dans ce paragraphe sous plusieurs thèmes : chaussées, terrassements et ouvrages routiers en terre, assainissement et enfin, gestion de crise en milieu urbain.

12.1 - Liste des variables concernées

12.1.1 - Thème « chaussée »

Les référentiels appliqués à la conception et la construction des couches de chaussées, font appel à des variables de températures, de précipitations, de vent. Plusieurs de ces variables font l'objet de demandes de précisions.

Les indices de gel atmosphérique de référence interviennent dans le dimensionnement des infrastructures de transports, puisque la vérification au gel des infrastructures est basée sur la notion de comparaison entre l'indice de gel atmosphérique admissible de la chaussée et l'indice de gel de référence, calculé conformément à la norme NF P 98-080-1 (annexe A normative) [32]. Le premier indice dépend de la nature des matériaux constituant la chaussée et sa plate-forme et de leur épaisseur essentiellement ; le second dépend de la localisation géographique du projet. Le calcul est basé sur la connaissance de la température moyenne journalière.

Pour ajuster le dimensionnement au gel des infrastructures neuves, une bonne **connaissance régionalisée de ces indices de gel** est indispensable. En effet, les données actuelles sont de l'ordre de

95 valeurs sur l'ensemble du territoire français, ce qui est insuffisant pour décrire les hétérogénéités du climat et prendre en compte des reliefs correctement. Des travaux récents ont permis d'établir une régionalisation en point de grille 1 km sur la France avec Météo France, mais ces nouvelles données ne sont pas actuellement prises en compte dans les référentiels. Ainsi, pour cette variable, la régionalisation est nécessaire. Il en va de même pour la révision des rangs des indices retenus comme référence dans le dimensionnement. En effet, sans révision des rangs, un sur-dimensionnement des infrastructures sera réalisé de façon quasi-systématique.

Les cycles saisonniers de température influent sur les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux. Ils sont pris en compte à travers le paramètre « température équivalente » dans le dimensionnement des chaussées de matériaux dits « noirs ». En France, la température équivalente retenue est de 15 °C. Une meilleure **connaissance spatiale de la température atmosphérique moyenne journalière** permettrait d'affiner régionalement la valeur de la température équivalente retenue et donc le dimensionnement des chaussées. Un découpage du territoire français en trois zones de « température équivalente » paraîtrait suffisante pour ne pas trop complexifier l'usage actuel de ce paramètre. La prise en compte des reliefs serait également utile (échelle supérieure à une station par département).

Les températures moyenne, maximale et minimale journalière, mensuelle et annuelle interviennent également dans le choix de la nature des liants hydrocarbonés et des mélanges hydrocarbonés utilisés. Ainsi, des liants de grades durs sont utilisés dans les régions les plus chaudes, car plus résistants au fluage. Les liants de grades plus mous sont utilisés sous les climats plus sévères en hiver, car ils sont plus résistants à la fissuration thermique. L'ancien guide d'application des normes enrobés [33] et le Cahier des clauses techniques particulières – CCTP – type du fascicule n°27 [34] reprennent des tableaux des principaux climats présents en France (océanique, méridional, continental ou montagnoux) avec des zones d'usage de certains produits, en fonction également de l'altitude. Les notions de moyenne des températures minimales journalières en janvier / février ou des températures maximales journalières de juillet / août sont notamment prises en considération.

Une **connaissance spatiale plus fine des amplitudes de températures annuelles** (température minimale et maximale de surface de chaussée) et **des amplitudes de température journalière** permettraient de circonscrire des régions potentielles d'utilisation des liants hydrocarbonés à l'avenir. Notamment une meilleure connaissance des amplitudes journalières permettrait de mieux appréhender les dégâts survenus sur les réseaux. En effet, dans l'état actuel des spécifications, le changement climatique pourrait être la cause d'impacts tels que l'augmentation des pathologies de type orniérage, le ressuage des enrobés et des conditions de mise en œuvre plus contraignantes pour les bétons notamment.

Le vent intervient dans de nombreux CCTP qui indiquent qu'au-delà de 30 km/h, la mise en œuvre des enrobés est à éviter. En effet, la convection forcée induite par le vent a tendance à refroidir trop rapidement le matériau lors de sa mise en œuvre, alors perturbée notamment au niveau des compacités recherchées. **Les précipitations** peuvent également avoir un rôle majeur sur la mise en œuvre, qui est interdite dans certaines conditions de pluies pour certains types de matériaux. Elles jouent également sur les délais de prise des matériaux, permettant d'obtenir des performances mécaniques dans les temps définis dans les études de formulation. Ces deux derniers paramètres ont besoin d'être précisés, car ils risquent d'influencer les délais de chantiers et le calcul des jours d'intempéries à partir de statistiques mises à jour sur le siècle futur. Le cas particulier de la mise en œuvre des bétons est à étudier, car plusieurs documents indiquent des spécifications sur leur mise en œuvre et conditionnent également leur usage en fonction des chutes de neige ou des zones climatologiques Hi.

12.1.2 - Thème « terrassements et ouvrages routiers en terre »

Les règles de conception et de mise en œuvre des travaux de terrassement et des ouvrages en terre font appel, entre autre, à la teneur en eau du matériau utilisé. Les variations de cette teneur ont des effets sur la portance, le matelassage, la glissance et les possibilités de réutilisation. Elles influent donc directement sur le bon déroulement du chantier de terrassement et de la mise en œuvre des ouvrages en terre.

Les variations de la teneur en eau des matériaux dépendent des conditions météorologiques mesurées par les variables climatiques. De façon simplifiée, trois grands ensembles de variables influencent les terrassements :

- **les variables concernant les apports d'eau dans les matériaux.** Ces apports prennent la plupart du temps la forme de **précipitations**. Les précipitations, et en particulier **leur fréquence** et **leur intensité**, constatées durant l'extraction et la mise en œuvre du matériau, conditionnent l'utilisation des matériaux de terrassement. Ainsi, sous certaines situations pluviométriques (orage ...), la mise en œuvre des matériaux peut être interdite. Enfin, les précipitations interviennent dans le calcul du nombre de jours d'arrêt prévisible du chantier indiqué dans les pièces particulières de marché (CCTP et CCAP). Par ailleurs, l'augmentation des fréquences des fortes pluies peut entraîner une fragilisation des talus (glissement de talus ...), une érosion des sols et / ou une destruction des ouvrages en terre (tassement ...) ;
- **les variables concernant le départ d'eau hors des sols.** Elles caractérisent le pouvoir évaporant de l'atmosphère. Ce pouvoir se mesure via l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ETP influe la teneur en eau des matériaux et donc, les stratégies de mise en œuvre et de maintien des ouvrages en terre. En particulier, des phénomènes de retrait dus à l'évapotranspiration peuvent engendrer des fissurations sur les plates-formes routières ou des instabilités superficielles de talus. Une augmentation des dégradations de type tassement pourra être rencontrée pour les routes à trafic faible à moyen présentant une épaisseur de structure de chaussée faible à moyenne et réalisées sur des sols sensibles au retrait gonflement. Par ailleurs, l'ETP intervient dans le calcul du nombre de jours d'arrêt prévisible du chantier indiqué dans les pièces particulières de marché (CCTP et CCAP),
- Les autres variables :
 - le gel (fréquence et intensité) : cette variable peut influencer le planning du chantier en entravant d'autres corps de métier ; il peut interdire, par exemple, en certaines périodes l'engazonnement et les plantations ;
 - le vent : outre son action évaporant, il peut gêner ou interdire le traitement aux liants hydrauliques, la réalisation de remblai en sable fin, etc. ;
 - la neige : elle a un pouvoir mouillant des sols très important ;
 - le brouillard : il entraîne une insécurité et peut donc provoquer des arrêts de chantier ;
 - les orages : ils sont la cause d'érosion ou de destruction des ouvrages.

Une connaissance précise avec une dispersion spatiale relative aux grands ensembles géographiques :

- des hauteurs moyennes mensuelles en mm ;
- du nombre de jours où les précipitations ont dépassé un certain seuil (1 et 5 mm) par mois sur les trente dernières années ;
- du cumul pluviométrique sur trois jours glissants supérieur à 100 mm ;
- du nombre de jours de pluie supérieure à 10, 25, 50 et 100 mm ;
- de l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle sur une période de 10 ans ;
- de la température moyenne mensuelle ;
- du nombre de jours où le vent dépasse un certain seuil (30 km/h) par mois sur les dix dernières années ;
- du nombre de jours où les températures sont inférieures à un certain seuil (5 °C) par mois sur les trente dernières années ;
- l'intensité et la durée du gel sur les dix dernières années et la probabilité d'apparition du premier gel ;

permettrait de mieux appréhender les conditions de mise en œuvre des matériaux de terrassement et de mieux connaître les délais de chantier.

12.1.3 - Thème « assainissement »

Le paramètre « intensité des précipitations » intervient dans le dimensionnement des ouvrages d'assainissement routiers. En effet, les données d'entrée sont les **intensités de pluie à différentes périodes de retour**, généralement comprises entre 10 et 100 ans. Ainsi, **les données de précipitations sur des durées très courtes : de 6 à 30 minutes sont requises** pour calculer les débits permettant de dimensionner les ouvrages d'assainissement (ouvrages de plate-forme, bassins d'orage, rétablissement d'écoulement naturel). Dans l'état actuel des spécifications dans ce domaine, des risques de sous-dimensionnement d'ouvrages sont à craindre : la fréquence des événements pluvieux extrêmes est en effet susceptible d'augmenter.

12.1.4 - Thème « gestion de crise en milieu urbain »

Il pourrait être intéressant de faire évoluer **les guides traitant de la gestion de crise dans le domaine des transports en milieu urbain**. L'augmentation de la fréquence des événements extrêmes aura probablement un impact sur ces guides, même si les variables climatiques qui y sont utilisées ne s'insèrent pas dans des formules.

En effet, en contexte urbain, un événement climatique extrême peut impacter de grandes populations, le fonctionnement simultané de plusieurs modes de transports (véhicules particuliers, transports en commun, modes doux) et enfin, la résilience de la ville dans toute la complexité de ses attributs (humains, économiques et stratégiques). Ainsi, les plans de gestion de crise doivent permettre d'orienter des populations importantes, de prendre en compte la diversité des usagers et de rétablir les connexions stratégiques indispensables aux activités humaines, économiques et stratégiques au sein de la ville.

12.2 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels routiers

Variables concernées	Aléas climatiques observées	Sous-variable	Demande de précisions		Variables de Jouzel
			Échelle spatiale	Échelle temporelle	
Gel	Diminution partout en France	Intensité et durée du gel : indices de gel	Suffisante pour réalisation de cartes d'iso-valeurs 25 °C.j	30 ans minimum (60 ans actuellement pour retenir l'indicateur)	À rapprocher de T08, T09, T10
		Probabilité d'apparition du premier gel	À déterminer pour pouvoir prendre en compte des changements de décades d'un point de vue temporel	Par décade par exemple (période de 10 jours suffisante pour prévision planning des chantiers – à définir)	
Précipitations	<p>Possible diminution du nombre de jours de précipitations au printemps et en été</p> <p>Diminution du nombre de jours de neige</p> <p>Diminution en fréquence et augmentation en intensité des événements extrêmes</p>	<p>Intensité maximale sur une période de 6 min</p> <p>Intensité minimale, moyenne, maximale (horaire, quotidienne, mensuelle, annuelle)</p> <p>Nombre de jours de sécheresse</p> <p>Nombre de jours où les précipitations dépassent un certain seuil (1 à 5 mm)</p> <p>Cumul pluviométrique sur trois jours glissants supérieur à 100 mm</p> <p>Nombre de jours de pluie supérieure à 10, 25, 50 et 100 mm</p>	À déterminer, beaucoup d'études au cas par cas à l'échelle du bassin versant routier	Statistiques 30 ans et événements extrêmes (crue centennale...)	À rapprocher de P01, P02, P03 et P04

Variables concernées	Aléas climatiques observées	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Températures	Augmentation des températures moyennes Augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes	Températures moyennes maximales et minimales mensuelles Températures moyennes mensuelles Nombre de jours de Tmax anormalement élevée (canicule) Nombre de jours où les températures sont inférieures à un certain seuil (5 °C) par mois sur les trente dernières années	Échelle des zones symposium ou échelle proposée par les modèles météorologiques (maille 8 km sur le territoire), à définir	Statistiques 30 ans et événements extrêmes (canicule)	T02 T03 T05
Vent	Pour la France métropolitaine : faible tendance à la diminution dans la partie Sud du pays, signe des changements indéterminé sur la partie Nord. Projections incertaines	Nombre de jours où le vent dépasse un certain seuil (30 km/h) par mois	À déterminer pour pouvoir faire un zonage de 10 km/h. Maillage de la mesure à définir	Sur les 10 dernières années	V01 pour vents extrêmes
Évaporation, ensoleillement, insolation		Évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle	Déterminer le zonage possible	Statistique 10 ans suffisante car moins de dispersion que sur d'autres paramètres	
Brouillard				Idée de la fréquence pour planification de travaux	

Tableau 8 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels routiers. Source : Cerema.

Plus globalement, comme plusieurs documents techniques le proposent, il pourrait être intéressant de **maintenir un zonage climatique à l'échelle de la France**, zonage qui couplerait certains paramètres de précipitations et de températures à déterminer.

13 - Précisions pour les ouvrages d'art routiers

13.1 - Pour la température

Des précisions sont nécessaires sur les hypothèses à retenir pour le **nombre de jours de gel** et pour les **alternances de gel / dégel**. Ces paramètres ont une influence directe sur la durabilité des matériaux constitutifs des ouvrages. Associés au nombre de jours de neige, ils permettent de déterminer l'intensité du salage des routes. Cette quantité de sel est utilisée dans des modèles de vieillissement des ouvrages, sur lesquels les politiques de gestion du patrimoine doivent s'appuyer pour optimiser les actions de maintenance. La résistance au gel, aux cycles de gel / dégel et aux chlorures sont des caractéristiques essentielles de la formulation des bétons des ouvrages neufs : ils permettent de l'adapter aux conditions d'environnement prévisibles sur leur durée de projet (cent ans). Ces données sont également indispensables pour apprécier la vulnérabilité des ouvrages existants vis-à-vis de ces attaques mécaniques et physico-chimiques.

13.2 - Pour les précipitations

La connaissance de l'évolution des **phénomènes de crue** est importante. Les hypothèses de pluviométrie qui permettent de déterminer comment la fréquence des crues, leurs intensités et les valeurs extrêmes évolueront, sont recherchées. Ces éléments permettent d'étudier l'**évolution des risques d'affouillement** des appuis des ouvrages (ponts et murs de soutènement) et des remblais d'accès et donc, les mesures à prendre sur les parcs d'ouvrages pour y faire face. La transparence hydraulique des aménagements liés aux infrastructures pourra être vérifiée sous ces hypothèses.

13.3 - Pour le vent

Les caractéristiques des vents extrêmes (franchissement de niveaux) sont des données nécessaires pour évaluer les effets sur les ouvrages à câbles et les parcs des équipements de la route (portiques de signalisation, murs antibruit, etc.). Cependant, des données supplémentaires sur les modifications possibles des régimes de turbulence ou les durées de franchissement de niveaux de vent sont essentiels pour apprécier certains effets du vent sur des parties d'ouvrages.

13.4 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels d'ouvrages d'art

Variables concernées	Aléas climatiques observées	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Températures	Augmentation des températures moyennes Augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes	Températures moyennes maximales et minimales annuelles	Échelle proposée par les modèles météorologiques (maille 8 km sur le territoire)	Statistiques sur 30 ans	T02
		Nombre de jours de Tmax anormalement élevée (canicule)			T03
		Amplitude annuelle de température			T05
		Amplitude journalière de température			
		Température minimale et maximale journalière			
Gel	Diminution partout en France	Intensité et durée du gel : indices de gel	Suffisante pour réalisation de cartes d'isovaleurs 25 °C.j	30 ans minimum (60 ans actuellement pour retenir l'indicateur)	À rapprocher de T08, T09, T10
		Probabilité d'apparition du premier gel	À déterminer pour pouvoir prendre en compte des changements de décades d'un point de vue temporel	Par décade par exemple (période de 10 jours suffisante pour prévision planning des chantiers)	

Variables concernées	Aléas climatiques observées	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Précipitations	<p>Possible diminution du nombre de jours de précipitations au printemps et en été</p> <p>Diminution du nombre de jours de neige</p> <p>Diminution en fréquence et augmentation en intensité des événements extrêmes</p>	<p>Intensité maximale sur période de 6 min</p> <p>Intensité minimale, moyenne, maximale (horaire, quotidienne, mensuelle, annuelle)</p> <p>Nombre de jours de sécheresse</p>	À déterminer le long d'un cours d'eau	<p>Statistiques sur 50 ans</p> <p>Débit cinquantennal ou centennal</p>	À rapprocher de P01, P02, P03, P04
Vent	Pour la France métropolitaine : faible tendance à la diminution dans la partie Sud du pays, signe des changements indéterminé sur la partie Nord. Projections incertaines		Cas par cas pour les ouvrages sensibles aux effets du vent	<p>Statistiques sur 50 ans</p> <p>Vitesse cinquantennale</p> <p>Calage des lois de Gumbel et de Weibull des vitesses extrêmes</p> <p>Détermination des facteurs de pointes</p> <p>Caractéristiques de la turbulence</p>	V01

Tableau 9 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels d'ouvrages d'art. Source : Cerema.

14 - Précisions pour le domaine ferroviaire

14.1 - Pour la température

Il est important de bien connaître les **durées** et **ampleurs** des périodes chaudes pour affiner les périodes de maintenance du réseau et améliorer les spécifications en vue de la « tropicalisation » des installations et du matériel roulant.

Pour garantir la sécurité des circulations, l'exploration des zones sensibles pour les rétractations des argiles et la stabilité de la voie est indispensable.

Des précisions sur le **nombre de jours de gel** et les **alternances de gel / dégel** sont **nécessaires**.

14.2 - Pour les précipitations

La connaissance de l'évolution des **phénomènes de crue** est importante. Les hypothèses de pluviométrie qui permettent de déterminer comment la fréquence des crues, leurs intensités et les valeurs extrêmes évolueront sont recherchées. La maîtrise du risque inondation implique d'avoir des prévisions régionales fiables avec des temps de retour de 30, 100 et 1 000 ans.

Pour anticiper les moyens préventifs à déployer, il faut bien connaître les **quantités de neige** pour la gestion des circulations et éviter le phénomène de déshabitude.

Comme pour les évolutions de la température, l'exploration des zones sensibles pour les gonflements des argiles et la stabilité de la voie est indispensable pour garantir la sécurité des circulations.

14.3 - Pour le vent

Les caractéristiques des **vents extrêmes** sont nécessaires pour évaluer les effets sur le système d'alimentation et la gestion des circulations.

14.4 - Globalement

Le point central ici est de maintenir au plus juste les besoins d'investissement en infrastructures et équipements nécessaires pour faire face au changement climatique. Pour cela, nous recommandons une démarche en trois temps :

- premièrement, revoir les normes de conception, d'inspection des ouvrages et équipements afin de pouvoir détecter à temps les phénomènes d'usure prématurée, d'obsolescence ou de fragilisation qui pourraient résulter de conditions climatiques plus rudes et concevoir un outil de production plus robuste.
- deuxièmement, adapter les cycles de maintenance en conséquence afin de maintenir, autant que possible, le cycle de vie des actifs concernés ;
- troisièmement, au fur et à mesure que des investissements de remplacement ou de capacité s'avèrent nécessaires, y inclure systématiquement un volet contenant des critères de résilience aux conditions climatiques à venir.

Ainsi, des données climatiques de référence seront utiles pour le « climate proofing » des investissements et il conviendra de définir la gouvernance climatique liée aux « Transports ».

14.5 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels ferroviaires

Variables concernées	Aléas climatiques observés	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Températures	Augmentation des températures moyennes Augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes	Températures moyennes maximales et minimales annuelles	Échelle des zones symposium ou échelle proposée par les modèles météorologiques (maille 8 km sur le territoire)	Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	T01 T02 T03 T05
		Nombre de jours de Tmax anormalement élevée (canicule)			
Gel	Diminution partout en France	Amplitude annuelle de température	Suffisante pour établir des cartes d'iso-valeur à l'échelle régionale	À l'échéance de 30 ans minimum	À rapprocher de T04, T08, T09, T10
		Amplitude journalière de température			
		Température minimale et maximale journalière	À déterminer pour pouvoir prendre en compte des changements de décades d'un point de vue temporel	Par décade par exemple (période de 10 jours suffisante pour prévision planning des chantiers)	

Variables concernées	Aléas climatiques observées	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Précipitations	Possible diminution du nombre de jours de précipitations au printemps et en été Diminution du nombre de jours de neige Diminution en fréquence et augmentation en intensité des événements extrêmes	Hauteur de pluie journalière Hauteur de pluie maximale annuelle de durée 6 min, 30 min, 1 h, 6 h, 24 h Hauteur de pluie minimale, moyenne, maximale par saison ou annuelle (horaire, journalière, mensuelle, annuelle) Cumul de hauteur de pluie sur 3, 15 et 30 j Nombre de jours de sécheresse Nombre d'événements pluvieux par saison Durée moyennes des événements pluvieux par saison	Carte des hauteurs de pluie et des intensités (précision au km ²) Carte régionale des couloirs d'orage (précision au km ²) Données aux échelles proposées par les modèles météorologiques (certaines données sont au km ² aujourd'hui)	Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans Évolution des temps de retour des paramètres lame d'eau et intensité (pour des périodes de retour 10 et 100 ans) Répartition saisonnière des pluies et des périodes de sécheresse	P01 P02 P03 P04 P05
Vent	Pour la France métropolitaine : faible tendance à la diminution dans la partie Sud du pays, signe des changements indéterminé sur la partie Nord. Projections incertaines	Nombre de jours de vent supérieur à un seuil (à déterminer) Nombre d'événements de type tempête		Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	V01 pour vents extrêmes
Évaporation, ensoleillement, insolation				Statistique 10 ans suffisante car moins de dispersion que sur d'autres paramètres	
Brouillard		Fréquence		Idée de la fréquence pour planification de travaux	
Grêle	Orage de pluie et grêle mêlées – facteurs aggravants pour le ruissellement et le transport solide (débris de végétaux-boue...)	Localisation des orages de grêles	Carte des nombres de jours de précipitations avec grêle / an (cartographie au km ² à relier avec la carte des couloirs d'orage)	Évolution sur 10 et 30 ans	
Foudre		Localisation et nombre d'impacts/j	Carte des impacts de foudre (nombre/j – nombre/an)	Statistiques sur 10 et 30 ans	

Variables concernées	Aléas climatiques observées	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Évolution du battement de la nappe	Augmentation de l'ampleur du battement de nappe	Niveau piézométrique Amplitude des variations	Carte régionale (données les plus fines possibles)	Évolution sur 30 ans	
Modification du couvert végétal	Modification des conditions de ruissellement	Localisation des modifications du couvert végétal (saisonnier et multi-annuel)	Cartographie des modifications des cultures et de la végétation naturelle	Évolution sur 10, 30 et 100 ans	

Tableau 10 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels ferroviaires. Source : Cerema, RFF, SNCF, STRMTG.

15 - Précisions pour le domaine fluvial et maritime

L'analyse des référentiels montre l'utilisation de deux types de variables climatiques :

- les variables dont les valeurs sont déterminées à partir d'études statistiques locales (notion de période de retour) ;
- des variables dont les valeurs sont définies par des textes.

15.1 - Les variables basées sur des études statistiques (notion de période de retour)

15.1.1 - Les niveaux d'eau

Les **niveaux d'eau** interviennent dans la conception des infrastructures à plusieurs niveaux. Par exemple, le niveau minimum est nécessaire pour la justification de la stabilité des ouvrages ; les niveaux maximum sont nécessaires pour déterminer les cotes d'arase des infrastructures ; dimensionner sous charge hydraulique maximum ; les niveaux moyens sont nécessaires pour les fonctionnements des barrages mobiles...

Pour le dimensionnement de ces infrastructures, une bonne connaissance des niveaux d'eau est nécessaire, car ils peuvent jouer sur la géométrie de l'ouvrage et sa stabilité. Le dimensionnement des ouvrages s'appuie également sur des **périodes de retour de niveau d'eau**, définies dans les référentiels et étudiées par ouvrages. Ces niveaux sont donc définis à partir de méthodes statistiques. L'intégration des valeurs de projections d'élévation du niveau marin dans les projets d'infrastructure, fait apparaître un **besoin de valeurs plus régionalisées**.

Une question se pose également sur la manière de prendre en compte cette élévation : lorsqu'on calcule un ouvrage sur 100 ans par exemple, avec quel niveau d'eau dimensionner (actuel, dans 50 ans, dans 100 ans ?). Lorsqu'on dimensionne dans X années, attend-on la même performance de l'ouvrage ? Quel niveau d'eau prendre en compte pour évaluer la corrosion sur les structures et améliorer ainsi leur durabilité ?

15.1.2 - La houle

Pour le dimensionnement des infrastructures maritimes, la **houle** constitue une variable de dimensionnement importante (fortement liée au niveau d'eau en proche côtier). De même que pour l'action quasi-statique du niveau d'eau, les valeurs représentatives et de calcul de la houle s'appuient sur des données statistiques permettant de définir des houles de projet pour dimensionner les ouvrages. Des projections des amplitudes et périodes des houles sont nécessaires. Une réflexion sur l'intégration de ces projections dans les dimensionnements devra ensuite être menée.

En outre, les **champs de pressions** sont aussi nécessaires pour déterminer les houles au large. La connaissance de ces champs de pressions futurs permettra de déterminer les climats de houles au large, à la côte. Par conséquent cette donnée est essentielle pour la détermination de la variable houle et donc la conception des ouvrages.

15.1.3 - Les débits

Pour les infrastructures fluviales, la connaissance des débits d'étiage, débits moyens journaliers, mensuels, annuels ..., et des débits de crue (annuelle, décennale, centennale ...) est nécessaire, tant pour la conception que pour l'exploitation des ouvrages. On travaille encore avec des valeurs s'appuyant sur des périodes de retour d'occurrence d'un phénomène afin d'utiliser les valeurs représentatives des événements. Une fois encore, il faudra s'interroger sur les **projections à l'échelle locale** sur ces paramètres et sur la manière de les intégrer dans les référentiels.

15.2 - Des variables utilisées comme donnée d'entrée

15.2.1 - La glace

La **glace** est mentionnée comme **surcharge** pouvant s'exercer sur certaines parties d'ouvrages hydrauliques. Les valeurs sont déterminées à l'aide de la réglementation allemande.

15.2.2 - Le vent

Les **vitesses de vent moyen**, les **roses des vents**, ainsi que les événements extrêmes sont utilisés pour le dimensionnement des infrastructures maritimes. Les cartes de vent utilisées sont données dans les Eurocodes.

Des règles d'exploitation sont souvent liées à ces conditions de vent, une modification de l'occurrence des événements peut donc avoir une incidence sur l'exploitation d'un port.

15.2.3 - La neige

On renvoie aux cartes des Eurocodes à éventuellement actualiser en fonction des projections.

15.2.4 - La température

On renvoie aux cartes des Eurocodes à éventuellement actualiser en fonction des projections.

15.3 - En résumé

Pour les variables climatiques nécessitant des études de site spécifiques basées sur des données statistiques, il est nécessaire de connaître les projections sur les valeurs des variables et de s'interroger sur leur intégration dans le dimensionnement des infrastructures.

Pour les variables climatiques données par les textes, il faut s'interroger sur une mise à jour des cartes de référence pour le dimensionnement et savoir comment intégrer les projections dans le dimensionnement ou dans les règlements d'exploitation.

15.4 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels du domaine maritime et fluvial

Variables concernées	Aléas climatiques observés	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Niveau marin	Augmentation du niveau marin		Cartes d'iso-valeur à l'échelle régionale	Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	
Climat de houle au large			Atlas des houles du futur pour la métropole et les DOM	Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	
Précipitations	Possible diminution du nombre de jours de précipitations au printemps et en été Diminution du nombre de jours de neige Diminution en fréquence et augmentation en intensité des événements extrêmes	Crues Débit d'étiage	Cartes de crues à l'échelle régionale Cartes de débits d'étiage à l'échelle régionale	Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	

Tableau 11 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels liés au domaine maritime et fluvial. Source : Cerema, VNF.

16 - Précisions pour le domaine aéroportuaire

D'après l'analyse des référentiels, les variables climatiques utilisées dans l'exploitation des infrastructures sont des variables utilisées comme données d'entrée ou des moyennes de températures calculées. Si le climat change, les données d'entrée changent mais ne remettent en cause ni les formules, ni les calculs dans lesquels elles sont utilisées.

16.1 - Typologie de climat

Les normes et recommandations liées à la conception des infrastructures de chaussées aéronautiques sont basées sur des normes routières et suivront donc les évolutions liées au domaine routier. Le besoin de précisions évoqué au chapitre 12.2 pourrait s'appliquer à la conception des chaussées aéroportuaires. Toutefois, bien que les **chaussées aéronautiques** présentent des qualités d'usage identiques à celles des chaussées routières, les sollicitations induites par le trafic sont très variables, tant en intensité qu'en nombre. Ces caractéristiques et ces particularités se traduisent par un choix différent des constituants des enrobés et produits bitumineux et de leur formulation, ainsi qu'une adaptation des modalités de mise en œuvre et de contrôle. Le guide d'application des normes : « enrobés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques » [35] édité par le Service Technique de l'Aviation civile, propose les caractéristiques et formules utilisées en France pour l'ensemble des enrobés hydrocarbonés à chaud utilisables en couche de roulement, de liaison et de base, pour les enduits superficiels d'usure et les enrobés coulés à froid. Les spécifications relatives au choix des produits sont guidées par la notion de « niveau de sollicitation », qui résulte, pour un aéroport donné, de la combinaison de deux facteurs : la classe de trafic et le type de climat. C'est ce dernier point qui peut potentiellement évoluer.

Quatre types de climat ont été définis, sur la base des températures relevées sur un grand nombre d'années « valeurs normales » de Météo France, à partir des moyennes des températures maximales journalières sur les deux mois les plus chauds et des moyennes des températures minimales journalières sur les deux mois les plus froids de l'année :

- type 1 à dominante océanique ;
- type 2 à dominante méditerranéenne ;
- type 3 à dominante continentale ou montagneuse ;
- type 4 à dominante tropicale.

Selon les données du changement climatique, certains aéroports pourraient changer de type de climat et donc de niveau de sollicitation. Les choix des produits pourraient alors changer.

		Moyenne des températures maximales journalières sur les 2 mois les plus chauds	
		T < 27 °C	T > 27 °C
Moyenne des températures minimales journalières sur les 2 mois les plus froids	T > 14 °C	Type 4 : dominante tropicale	
	0 °C ≤ T ≤ 14 °C	Type 1 : dominante océanique	Type 2 : dominante méditerranéenne
	T < 0 °C	Type 3 : dominante continentale ou montagneuse	sans objet

Tableau 12 : Définition du type de climat. Source : STAC.

Des précisions relatives aux moyennes des températures minimales journalières sur les deux mois les plus froids et les moyennes des températures maximales journalières sur les deux mois les plus chauds permettront d'évaluer quels aérodromes sont susceptibles de changer de type de climat dans les années à venir.

Par ailleurs, certains aéroports localisés sur le littoral sont équipés d'ouvrages de protection contre la houle et la marée, ces ouvrages sont dimensionnés selon les normes et réglementations du domaine maritime et fluvial. Le besoin de précisions évoqué dans la partie 15 s'applique donc pour ces ouvrages.

16.2 - Température de référence d'aérodrome

Selon le volume I de l'annexe 14 de l'OACI – Organisation de l'Aviation Civile – relatif à la conception des aérodromes [36], il est recommandé de considérer comme température de référence d'aérodrome la moyenne des températures maximales quotidiennes du mois le plus chaud de l'année (le mois le plus chaud étant celui pour lequel la température moyenne mensuelle est la plus élevée). Cette température devrait être la valeur moyenne obtenue sur plusieurs années.

16.3 - Vent

L'aérodrome doit être conçu de façon à recevoir les avions dans la plupart des conditions de vent normales. Ce qui est un vent arrière sur une piste est un vent debout sur une piste de sens opposé. La longueur de piste augmente avec le vent arrière, aussi lorsque l'on emploie la notion de piste bidirectionnelle (c'est-à-dire en utilisant théoriquement un vent debout dans toutes les circonstances pour établir la longueur de piste), c'est la condition de vent nul qui est critique tant pour le décollage que pour l'atterrissage. Toutefois, cela impose un changement du sens d'utilisation de la piste chaque fois que le vent tourne et la longueur de piste n'est pas suffisante pour les mouvements qui seraient effectués par un vent arrière du fait de l'utilisation préférentielle de la piste. Ce problème se complique encore du fait que jusqu'à une vitesse de 9,2 km/h (5 kt), le vent est qualifié de « calme ». Les courbes et les tables de performances d'atterrissage établies par la FAA (Federal Aviation Administration) sont ordinairement fondées sur un vent arrière de 9,2 km/h (5 kt), pour tenir compte de la souplesse qu'exige l'exécution des atterrissages. En revanche, elles sont établies pour un vent nul. Dans les documents destinés aux planificateurs d'aéroports qui donnent les caractéristiques des avions, les courbes de performances de décollage sont établies pour un vent nul et les courbes de performances d'atterrissage pour un vent nul à une hauteur de 15 m (50 ft) ».

L'OACI [36] recommande les dispositions suivantes relatives aux vents de travers lors de la détermination de l'orientation, de l'emplacement et du nombre des pistes :

- il est recommandé de présumer que, dans les circonstances normales, il n'y aura ni décollage ni atterrissage si la valeur de la composante transversale du vent est supérieure à :
 - 37 km/h (20 kt) pour les avions dont la distance de référence est supérieure ou égale à 1 500 m ; toutefois lorsqu'on observe assez souvent une faible efficacité de freinage, due à un coefficient de frottement longitudinal insuffisant, il est recommandé d'admettre une composante transversale du vent ne dépassant pas 24 km/h (13 kt) ;
 - 24 km/h (13 kt) pour les avions dont la distance de référence est comprise entre 1 200 m et 1 500 m (non compris) ;
 - 19 km/h (10 kt) pour les avions dont la distance de référence est inférieure à 1 200m ;

Le supplément A, section 1 du volume I de l'annexe 14 [36], contient des éléments indicatifs sur les facteurs qui affectent le calcul d'évaluation du coefficient d'utilisation et sur les marges éventuelles à prévoir pour tenir compte de l'effet de conditions exceptionnelles.

Il est recommandé de choisir les données à utiliser dans le calcul du coefficient d'utilisation d'après des statistiques sur la répartition des vents, qui devraient porter sur une période aussi longue que possible, de préférence égale à cinq ans au moins. Les observations doivent être effectuées au moins huit fois par jour et à intervalles réguliers. Les vents mentionnés sont des vents moyens. La nécessité de tenir compte des conditions de rafales est mentionnée au supplément A, section 1 du volume I de l'annexe 14 [36].

Enfin, les bâtiments des aéroports (terminaux tour de contrôle...) sont normalement conçus pour résister à des vents de 130 à 200 km/h, selon la localité.

16.4 - Précipitations

Le rapport « adhérence sur pistes contaminées » [37] édité par le Service Technique de l'Aviation civile établit entre autres des zones climatiques (pour les aérodromes français) :

Les zones climatiques caractérisent la rigueur hivernale et sont définies par le calcul de l'indice de viabilité hivernale explicité dans la lettre-circulaire du 31 octobre 1996 [38]. Elles sont classées ainsi :

- TR : Hiver très rigoureux ;
- AR : Hiver assez rigoureux ;
- PR : Hiver peu rigoureux ;
- C : Hiver clément ;
- OM : Outre-Mer.

Pour exemple, l'aéroport de Saint-Pierre et Miquelon est classé dans la zone climatique « TR ».

Certains aérodromes pourraient changer de catégorie au vu de l'évolution de la pluviométrie.

16.4.1 - Submersion marine – Montée des eaux

Il serait souhaitable d'avoir des données plus précises concernant les projections sur la montée des eaux en France et plus particulièrement dans les DOM-COM, où les aérodromes se situent souvent sur des îles de faible altitude. Une cartographie assez précise du niveau de submersion prévisible à l'horizon 2100 et prenant en compte les ouvrages de protections existant et le relief autour des aérodromes se trouvant en bordure du littoral est nécessaire.

Par ailleurs le niveau maximum de houle en cas de marée ou tempête est souhaitable. Sans ces projections, le niveau maximum de 1 mètre de montée des eaux pourrait être retenu, mais rendrait les résultats d'analyses de vulnérabilité alarmistes, avec une disparition de certains aéroports.

16.4.2 - Vents dominants

Par ailleurs, les projections climatiques existantes n'évoquent que très peu la variable « vents dominants ». Il serait souhaitable d'avoir une projection d'un éventuel changement de direction de vents dominants. Si un tel changement s'avère significatif, une cartographie des nouveaux vents dominants, avec les nouvelles orientations corrélées au nombre de jours prévisibles annuels, est souhaitable.

16.4.3 - DOM-COM

Enfin de manière générale, les données concernant les DOM-COM sont peu nombreuses. Même si le paramètre « montée des eaux » s'avère être un des aléas les plus impactants pour les aérodromes, des précisions sur la fréquence et l'intensité des cyclones ou tempêtes tropicales seraient souhaitables.

16.5 - En résumé

Les textes liés à la **conception** utilisent des formules qui resteront applicables quelles que soient les évolutions du climat.

Toutefois certaines données moyennes de températures extrêmes ou d'orientation et puissance du vent seraient nécessaires, tout comme la variation de la houle et du niveau de la mer. Elles permettraient d'améliorer l'évaluation de la vulnérabilité des aéroports au changement climatique. D'autres données complémentaires nécessaires à une analyse plus approfondie sont spécifiées dans le tableau 13.

16.6 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels aéroportuaires

Variables concernées	Aléas climatiques observées	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Températures	Augmentation des températures moyennes Augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes	Moyenne des températures minimales journalières sur les deux mois les plus froids (cf. bâtiments et ouvrages en terre et entretien des chaussées) Moyenne des températures maximales journalières	Cf. domaine routier. Le plus proche possible des aéroports	Cf. domaine routier. Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	T02 T03 T05
Précipitations	Possible diminution du nombre de jours de précipitations au printemps et en été Diminution du nombre de jours de neige Diminution en fréquence et augmentation en intensité des événements extrêmes	Cf. domaine routier (formulation des matériaux et bassins de récupération) Nombre de jours de sécheresse	Cf. autres domaines	Cf. autres domaines	Cf. domaine routier
Vent	Pour la France métropolitaine : faible tendance à la diminution dans la partie Sud du pays, signe des changements indéterminé sur la partie Nord. Projections incertaines	Changement d'orientation du vent prévisible Fréquence en jour/an et orientation du vent lorsque sa vitesse est supérieure à 19, 24 et 37 km/h et pour les événements extrêmes Valeurs des vents extrêmes (km/h)	Données à proximité des aéroports (dans un rayon de 10 km)	Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	V01 pour vents extrêmes

Variables concernées	Aléas climatiques observés	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Niveau marin	Montée du niveau marin	Montée des eaux prévisible en cm	Cartes d'iso-valeur à l'échelle régionale (à proximité des aéroports)	Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	Montée du niveau de la mer
Houle		Niveau de houle maximale et fréquence prévisible	Atlas des houles du futur pour la métropole et les DOM (à proximité des aéroports)	Évolution à l'échéance de 30, 50 et 100 ans	Variation du climat de houle

Tableau 13 : Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels aéroportuaires. Source : Cerema, STAC.

17 - Précisions pour le domaine spécifique aux remontées mécaniques et transports guidés

17.1 - Principales variables concernées

Vent et pluviométrie (neige et précipitations) sont les deux principales variables susceptibles de perturber l'exploitation des systèmes transports câble et de transports guidés urbains. Les documents de conception et maintenance / exploitation s'appuient sur les cartes introduites par les Eurocodes.

En ce qui concerne les chemins de fer secondaires et touristiques, les phénomènes de pluie intenses durables ou non sont les plus à redouter, en particulier sur les réseaux en relief difficile : ils peuvent en effet y engendrer des désordres soudains, susceptibles d'impacter les réseaux.

17.2 - Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels du domaine spécifique aux remontées mécaniques et transports guidés

Variables concernées	Aléas climatiques observés	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variabes de Jouzel
Températures	Augmentation des températures moyennes Augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes	Moyenne des températures minimales journalières sur les 2 mois les plus froids Moyenne des températures maximales journalières sur les 2 mois les plus chauds Nombre de jours de Tmax anormalement élevée (canicule)	Échelle des zones symposium ou échelle proposée par les modèles météorologiques (maille 8 km sur le territoire)	Statistiques 30 ans et événements extrêmes	T02 T03 T05
Précipitations (sauf neige)	Possible diminution du nombre de jours de précipitations au printemps et en été Diminution en fréquence et augmentation en intensité des événements extrêmes	Intensité maximale sur période de 6 minutes Intensité minimale, moyenne, maximale (horaire, quotidienne, mensuelle, annuelle)	Échelle des zones symposium ou échelle proposée par les modèles météorologiques (maille 8 km sur le territoire)	Statistiques 30 ans et événements extrêmes	P02 P03
Neige	Diminution du nombre de jours de neige	Nombre de jours de chutes de neige (température minimale quotidienne inférieure à 0 °C et précipitations quotidiennes non nulles et / ou extrêmes)	Échelle des zones symposium ou échelle proposée par les modèles météorologiques (maille 8 km sur le territoire)	Statistiques 30 ans et événements extrêmes	P05

Variables concernées	Aléas climatiques observés	Sous-variable	Demande de précisions Échelle spatiale	Demande de précisions Échelle temporelle	Variables de Jouzel
Vent	Pour la France métropolitaine : faible tendance à la diminution dans la partie Sud du pays, signe des changements indéterminé sur la partie Nord. Projections incertaines	Fréquence et orientations des vents extrêmes	Échelle des zones symposium ou échelle proposée par les modèles météorologiques (maille 8 km sur le territoire)	Statistiques 30 ans et événements extrêmes	V01

Tableau 14 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels relatifs aux remontées mécaniques et transports guidés. Source : Cerema, STRMTG.

Index des figures

Figure 1 : Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (CO ₂ et CH ₄) et d'un précurseur d'aérosols (SO ₂). Tout à gauche de la figure, on voit les émissions produites entre 1900 et 2000. Ensuite, six familles de scénarios sont présentées. Tous ces scénarios sont équiprobables. Source : GIEC, 2007 [7].....	13
Figure 2 : Découpage de la France en 5 grands domaines. Source : Peings Y., et al., 2011 [4]....	19
Figure 3 : Tableau de lecture des indicateurs et de leur évolution selon les modèles et les scénarios. Dans cet exemple, l'indice (en l'occurrence la température moyenne quotidienne) vaut 10,3 °C en moyenne sur la période de référence d'ALADIN-Climat et de MAR. Cet indice vaut 10,2°C pour LMDz. Source : Peings Y., et al., 2012 [5].....	20
Figure 4 : Indice T01. Température moyenne quotidienne en moyenne annuelle pour la période de référence et écarts entre les scénarios et la référence. Unité : °C. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	21
Figure 5 : Indice P01. Précipitations quotidiennes moyennes en été. Unité : mm/jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	22
Figure 6 : Indice P01. Précipitations quotidiennes moyennes au printemps. Unité : mm/jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	22
Figure 7 : Indice P01. Précipitations quotidiennes moyennes en hiver. Unité : mm/jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	22
Figure 8 : Indice P01. Précipitations quotidiennes moyennes en automne. Unité : mm/jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	22
Figure 9 : Indice P04. Nombre de jours annuels (à gauche) et estivaux (à droite) de sécheresse et écarts entre les scénarios et la référence. Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	23
Figure 10 : Indice H01. Minimum annuel du contenu en eau du sol, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Unité : kg/m ² . Source : Peings Y., et al., 2011 [4]..	23
Figure 11 : Indice P05. Nombre de jours de chutes de neige annuels (à gauche) et en hiver (en hiver). Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	24
Figure 12 : Indice V01. Vent maximal annuel, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Unité : km/h. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	25
Figure 13 : Élévation du niveau de la mer relative à la moyenne globale pour la période 2080-2099 par rapport à 1980-1999. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	27
Figure 14 : Indice T07. Nombre annuel de jours de vagues de chaleur. Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	29
Figure 15 : Indice T05. Nombre de jours de l'année pour lesquels TMAX est supérieure à la référence de 5°C, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	30
Figure 16 : Indice P02. Pourcentage des précipitations au-dessus du 90e centile annuel, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Source : Peings Y., et al., 2011 [4].....	30

Figure 17 : Indice P03. Nombre de jours avec plus de 20 mm de précipitations, pour la période de référence et les écarts entre les scénarios et la référence. Unité : jour. Source : Peings Y., et al., 2011 [4]. 31

Figure 18 : Photographie d'un remblai situé sur la RN158 à Macé (61) dont les désordres (fissurations et tassements) se sont aggravés suite à l'été 2003. Source : Cerema, DTerNC.....43

Figure 19 : Illustration des comportements des câbles d'alimentation électrique en cas de fortes chaleurs. Source : SNCF.....47

Figure 20 : Photographie d'érosion de colline suite à un événement pluvieux important survenu en Bretagne le 15 janvier 2008. Source : Olivier Malassingne (Cerema).....52

Figure 21 : Photographies d'un pont situé sur la rivière Saint-Étienne à la Réunion qui s'est effondré le 26 février 2007 lors du passage du cyclone Gamède sur la Réunion : ce phénomène s'est accompagné de fortes précipitations qui ont provoqué l'affouillement de certaines piles et la chute successive de plusieurs travées. Source : DDE La Réunion.....53

Figure 22 : Chemin de fer de Provence, février 2014. Source : STRMTG.....56

Figure 23 : Rame TGV franchissant le viaduc des Angles vers Avignon. Source : SNCF Médiathèque, Christophe Recoura.....61

Figure 24 : Déflecteurs installés sur le viaduc des Angles sur la ligne à grande vitesse TGV Méditerranée. Source : SNCF Médiathèque, Jean-Jacques D'Angelo.....61

Figure 25 : Calcul de la valeur du vent traversier. Source : STAC.....63

Figure 26 : Dommage sur un Airbus suite à une collision aviaire. Source : STAC.....68

Figure 27 : Exemple de prévision climatique. Source : Peings Y., et al., 2012 [5].....117

Index des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP. Source : Moss R.H., et al., 2010 [11].....	14
Tableau 2 : Tableau synthétisant les modèles utilisés, les scénarios d'évolution du climat et les périodes simulées. Source : Cerema.....	16
Tableau 3 : Projections climatiques d'ici 2099, pour l'Outre-Mer européen pour les températures et précipitations. Scénario A1B – GIEC 2007. Les fourchettes d'incertitude (quartiles 25/75%) sont indiquées entre crochets. Source : UICN, 2008 [22].....	34
Tableau 4 : Tableau présentant l'indicateur de température et ses tendances d'évolution (analyse des indices climatiques présentés dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [5]). L'échelle utilisée varie de 1 à 4, 4 étant le maximum. Source : Cerema.....	37
Tableau 5 : Tableau synthétisant les indicateurs de précipitations et leurs tendances d'évolution (analyse des indices climatiques présentés dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [5]). L'échelle utilisée varie de 1 à 4, 4 étant le maximum. Source : Cerema.....	38
Tableau 6 : Tableau présentant l'indicateur de vent violent et ses tendances d'évolution (analyse des indices climatiques présentés dans les rapports de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [5]). L'échelle utilisée varie de 1 à 4, 4 étant le maximum. Source : Cerema.....	38
Tableau 7 : Synthèse des impacts potentiels des évolutions climatiques par type d'infrastructures. Source : Cerema.....	74
Tableau 8 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels routiers. Source : Cerema.....	86
Tableau 9 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels d'ouvrages d'art. Source : Cerema.....	89
Tableau 10 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels ferroviaires. Source : Cerema, RFF, SNCF, STRMTG.....	93
Tableau 11 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels liés au domaine maritime et fluvial. Source : Cerema, VNF.....	96
Tableau 12 : Définition du type de climat. Source : STAC.....	97
Tableau 13 : Synthèse des demandes de précisions sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels aéroportuaires. Source : Cerema, STAC.....	102
Tableau 14 : Synthèse des demandes de précision sur les variables climatiques utilisées dans les référentiels relatifs aux remontées mécaniques et transports guidés. Source : Cerema, STRMTG.....	105
Tableau 15 : Requête dans la DTRF des référentiels routiers ayant des variables climatiques. Source : Cerema.....	119
Tableau 16 : Nombre de références à des variables climatiques trouvées dans la DTRF. Source : Cerema.....	120
Tableau 17 : Tableau de synthèse des méthodologies de recensement et des services impliqués dans le listing des référentiels et des demandes de projections, par type d'infrastructure. Source : Cerema.....	125
Tableau 18 : Référentiels routiers catégorisés. Source : Cerema.....	137

Tableau 19 : Référentiels de voiries urbaines catégorisés. Source : Cerema.....	139
Tableau 20 : Référentiels d'ouvrages d'art routiers catégorisés. Source : Cerema.....	141
Tableau 21 : Référentiels ferroviaires catégorisés. Source : RFF, SNCF.....	150
Tableau 22 : Référentiels maritimes, fluviaux et portuaires catégorisés. Source : Cerema, VNF.	154
Tableau 23 : Référentiels aéroportuaires catégorisés. Source : STAC.....	155
Tableau 24 : Référentiels spécifiques aux remontées mécaniques et transports guidés catégorisés. Source : STRMTG.....	158

18 - Acronymes

AI : Arrêté Ministériel

ALADIN : Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement InterNational

AIPCR : Association Internationale Permanente des Congrès de la Route

ANR SCAMPEI : Agence Nationale pour la Recherche, Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes

ARPEGE : Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

BT : Basse Température

CCAP : Cahier des Clauses Administratives Particulières

CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières

CEN : Comité Européen de Normalisation

Cerema : Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement

CETMEF : Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales

CETU : Centre d'Études Techniques des Tunnels

CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France

CTCHU : Chaussées Terrassement Chaussées Urbaines

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

DGEC : Direction Générale de l'Énergie et du Climat

DGITM : Direction Générale des Infrastructures de Transports et de la Mer

DOM-COM : Départements et Collectivités d'outre-mer

DS : Dossier de Sécurité

DTecEMF : Direction Technique Eau, Mer et Fleuves (Cerema, ex-CETMEF)

DTecITM : Direction Technique Infrastructures de Transport et Matériaux (Cerema, ex-SETRA)

DTecTV : Direction Technique Territoires et Villes (Cerema, ex-CERTU)

DTer : Direction Territoriale (Cerema, ex-CETE)

DTRF : Documentation des Techniques Routières Françaises

DVL : Détection de Vents Latéraux

DTRF : Documentation Technique Routière Française

EDF-LNHE : Électricité de France – Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

FAA : Federal Aviation Administration

FOD : Foreign Object Debris

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GTS : Guide de Traitement des Sols

HT : Haute Température
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (en français : GIEC)
IFRECOR : Initiative Française pour les Récifs Coralliens
IMFREX : Impact des changements anthropiques sur la Fréquence des phénomènes Extrêmes de vent, de température et de précipitations
IPSL : Institut Pierre Simon Laplace
ITAC : Instruction Technique sur les Aérodomes Civils
LGGE : Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement
LGV : Ligne à Grande Vitesse
LMDz : Laboratoire de Météorologie Climatique zoom
LRS : Long Rail Soudé
LTV : Limitation Temporaire de Vitesse
MAR : Modèle Atmosphérique Régional
MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie
OA : Ouvrages d'Art
OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale
ORSI : Opération de Recherche Stratégique et Incitative
PANS : Procedure for Air Navigation Services
PCI : Pôle de Compétence et d'Innovation
PNACC : Plan National d'Adaptation au Changement Climatique
PPHM : Portiques, Potences, Hauts-Mâts
RATP : Régie Autonome des Transports Parisiens
RCP : Representative Concentration Pathways
RFF : Réseau Ferré de France
RFN : Réseau Ferré National
RM : Remontée Mécanique
RTE : Réseau de Transport d'Électricité
SARPS : Standards And Recommended Practices
SETRA : Service d'Études sur les Transports, les Routes, et leurs Aménagements
SNCF : Société nationale des chemins de fer français
SRES : Special Report on Emissions Scenarios
SSP : Shared Socioeconomic Pathways
STAC : Service Technique de l'Aviation Civile
STARDEX : Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions
STI : Spécifications Techniques d'Interopérabilité
STRMTG : Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés
TG : Transport Guidé
TGV : Train à Grande Vitesse

UIC : Union Internationale des Chemins de fer

UT : Unité de Traitement

VH : Viabilité Hivernale

VNF : Voies Navigables de France

VT : Vent Traversier

19 - Bibliographie

19.1 - Bibliographie du rapport

- [1] Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. *Plan National d'Adaptation de la France aux effets du Changement Climatique 2011-2015* [en ligne]. 2011, 187 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible en ligne à l'adresse : <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC-PNACC-complet.pdf>>
- [2] Groupe de travail interministériel « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France ». *Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France* [en ligne]. Document d'étape. 2008, 247 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_complet_0907allegeV2_20-11-08.pdf>
- [3] Groupe de travail interministériel « Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France ». *Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France* [en ligne]. Rapport de la seconde phase. 2009, 108 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/partie_1_rapport_de_synthese.pdf>
- [4] Peings Y., et al. *Scénarios régionalisés. Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ALADIN-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM*. [en ligne]. Sous la direction de Jouzel J. 2^e édition. Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2011. [Consulté le 22.05.2015]. Le climat de la France au XX^e siècle, vol. 1, 140 p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/onerc_rapport_mission_jouzel_25janv2011_complet_V2_Web_VF.pdf>
- [5] Peings Y., et al. *Scénarios régionalisés. Indices de référence pour la métropole. Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ALADIN-Climat, LMDz et MAR* [en ligne]. Sous la direction de Jouzel J. 1^{ère} édition. Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2012. [Consulté le 22.05.2015]. Le climat de la France au XX^e siècle, vol. 2, 303 p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Rapport_scenarios_reference_fevrier_2012_Web_VF.pdf>
- [6] Planton S., et al. *Évolution du niveau de la mer. Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises* [en ligne]. Sous la direction de Jouzel J. 1^{ère} édition. Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2012. [Consulté le 22.05.2015]. Le climat de la France au XX^e siècle, vol. 3, 49 p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Rapport_niveau_de_la_mer_Web_VF.pdf>
- [7] GIEC. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [en ligne]. Sous l'équipe de rédaction, Solomon, S., et al. Cambridge (Royaume-Uni) et New York (État de New York, États-Unis d'Amérique) : Cambridge University Press, 2007, 996 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN : 978-0-521-8809-1 (hardback), 978-0-521-70596-7 (paperback). Disponible à l'adresse : <www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4_wg1_full_report.pdf>
- [8] GIEC. *Rapport spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Résumé à l'intention des décideurs. Rapport spécial du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [en ligne]. Cambridge (Royaume-Uni) : Cambridge University Press, 2012, 20 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN 978-92-9169-233-0. Disponible à l'adresse : <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_FR_web.pdf>
- [9] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [en ligne]. Sous l'équipe de rédaction, Stocker T.F., et al. Cambridge (Royaume-Uni) et New York (État de New York, États-Unis d'Amérique) : Cambridge University Press, 2013, 1535 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN : 978-1-107-

05799-1 (hardback), 978-1-107-66-182-0 (paperback). Disponible à l'adresse :
<https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf>

[10] IPCC. *Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [en ligne]. Sous l'équipe de rédaction, Nakicenovic N., et al. Cambridge (Royaume-Uni) et New York (État de New York, États-Unis d'Amérique) : Cambridge University Press, 2000, 599 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN : 0-521-80081-1 (hardback), 0-521-80493-0 (paperback). Disponible à l'adresse : <https://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/emissions_scenarios.pdf>

[11] Moss R.H., et al. *The next generation of scenarios for climate change research and assessment* [en ligne]. Dans : *Nature*, 2010, n° 463, pp.747-756. [Consulté le 22.05.2015]. DOI : 10.1038. Disponible à l'adresse : <<http://www.nature.com/nature/journal/v463/n7282/full/nature08823.html>>

[12] DGEC / ONERC. *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC* [en ligne]. Synthèse technique. 2013, 12 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_decouvrir_scenarios_Giec.pdf>

[13] Piazza M., et al., *Évaluation du changement climatique sur les zones de montagne en France à partir des méthodes de régionalisation. La Houille Blanche*. 2012. Sous presse.

[14] DGEC / ONERC. *Synthèse. Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles* [en ligne]. Synthèse technique. 2010, 4 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/synth_niveau_mer.pdf>

[15] Laugel, A. *Climatologie des états de mer en Atlantique nord-est : analyse du climat actuel et des évolutions futures sous scénarios de changement climatique par descente d'échelle dynamique et statistique* [en ligne]. Thèse de doctorat : génie côtier : Paris : Université Paris-Est, 2013, 197 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/966849/filename/TH2013PEST1120_incomplete.pdf>

[16] Lehtikoinen E., et al. *Arrival and departure dates* [en ligne]. Dans : *Advances In Ecological Research*, 2004, vol. 35, 31 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://users.utu.fi/karainio/projekti/pdf/Lehtikoinen&al_AdvEcolRes2004.pdf>

[17] Tucker, G. M., et Heath, M. F. *Birds in Europe: their conservation status*. Dans : BirdLife International, 1994, Conservation Series n° 3. Cambridge (Royaume-Uni).

[18] BirdLife International. *State of the world's birds 2004: indicators for our changing world* [en ligne]. Cambridge (Royaume-Uni) : BirdLife International, 2004, 73 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN : 0-946888-50-7. Disponible à l'adresse : <http://www.birdlife.org/datazone/userfiles/docs/SOWB2004_en.pdf>

[19] Sanderson F.J., et al. *Long-term population declines in Afro-Palaearctic migrant birds*. Dans : *Biological conservation*, vol. 131, n° 1, 2006, pp.93-105.

[20] Schultz S., et al. *Brain size and resource specialisation predict long-term population trends in British birds*. Dans : *Proceedings of the Royal Society of London*, 2005, Serie B Biological Sciences 272, n° 1578, pp.2305-2311. DOI : 10.1098.

[21] Sol D., et al. *Brain size, innovative propensity and migratory behaviour in temperate Palaearctic birds*. *Proceedings of the Royal Society of London*, 2005, Serie B Biological Sciences 272, n° 1571, pp.1433-1441. DOI : 10.1038.

[22] UICN. *Changement climatique et biodiversité dans l'outre-mer européen* [en ligne]. Sous la direction de Petit J. et Prudent G. Gland (Suisse) et Bruxelles (Belgique) : UICN : réimpression, 2010, 196 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN : 978-2-8317-1322-9. Disponible à l'adresse : <<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC-uicn-juillet2008.pdf>>

[23] MEFE / MEEDDAT. *Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux. Fascicule n°65. Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint* [en ligne].

Texte officiel. 2008, 277 p. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/F65_2012-05-30.pdf>

[24] AIPCR, Comité technique D.3 ponts routiers. *Adaptation au changement climatique pour les ponts*. 2011, 68 p. ISBN : 2-84060-241-5.

[25] MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES, ET DE L'INDUSTRIE. Arrêté interministériel du 17 mai 2001 fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique. Texte officiel. JORF, n° 134, 2001, pp. 9270.

[26] RFF. *Étude complémentaire n°4. Évaluation des incidences du réchauffement climatique sur l'infrastructure ferroviaire existante entre Montpellier et Perpignan* [en ligne]. 2008, 98 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-Inmp/DOCS/ETUDES_C/ETUDE_CO-4.PDF>

[27] AFNOR. *NF EN ISO 1461. Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis en fonte et en acier – Spécifications et méthodes d'essai*. Norme. 2009, 16 p.

[28] CETMEF / CETE Méditerranée / CETE de l'Ouest. *Vulnérabilité du territoire national aux risques littoraux, France métropolitaine* [en ligne]. Rapport. 2009, 170 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <<http://fr.calameo.com/read/0005873342f81dc9cc928>>

[29] ONERC. *Évaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France – Rapport de la seconde phase – Partie III – Rapports des groupes sectoriels* [en ligne]. 2009, 231 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/partie_3_rapports_des_groupes_sectoriels.pdf>

[30] DGAC / STAC. *Les oiseaux des aérodromes français. Prévention du péril aviaire* [en ligne]. 94 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/documents/oiseaux_ad_france.pdf>

[31] CFTR. *Guide technique. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des assises de chaussées*. Guide technique. Setra, 2007, 76 p.

[32] AFNOR. *NF P 98-080-1. Chaussées – Terrassements. Terminologie*. Norme. 1992, 14 p.

[33] SETRA, LCPC. *Enrobés hydrocarbonés à chaud. Guide d'application des normes pour le réseau routier national*. 1994, 162 p.

[34] MELTT. *Cahier des clauses techniques générales. Fascicule n°27. Fabrication et mise en œuvre des enrobés hydrocarbonés* [en ligne]. Texte officiel. 2012, 145 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/F27_2012-05-30.pdf>

[35] STAC. *Enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques. Guide d'application des normes* [en ligne]. Guide d'application des normes. 2^e édition. Bonneuil-sur-Marne (France) : STAC, 2009, 77 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN : 978-2-11-096931-6. Disponible à l'adresse : <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/documents/gan_apl_norm_2009c.pdf>

[36] ICAO. *International Standards and Recommended Practices. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Volume I Aerodrome Design and Operations* [en ligne]. 5^e édition. Montréal (Canada) : International Civil Aviation Organization, 2009, vol. 1, annexe 14, 328 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN : 978-92-9231-332-6. Disponible à l'adresse : <http://www.bazl.admin.ch/dokumentation/grundlagen/02643/index.html?lang=fr&download=NHZLpZeg7t.Inp6l0NTU042l2Z6ln1ae2lZn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCDeoB9g2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A-->>

[37] STAC. *Adhérence sur pistes contaminées* [en ligne]. Rapport d'étude. Bonneuil-sur-Marne (France) : STAC, 2010, 80 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/documents/adherence_piste_contaminee.pdf>

[38] MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT. Lettre-circulaire du 31 octobre 1996 relatif à la viabilité hivernale. Texte officiel. 1996, 16 p.

[39] DGAC / STAC. *Instruction Technique sur les Aérodrômes Civils, ITAC*. Guide technique. 2002.

[40] AFNOR. NF EN 12929-1. *Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Dispositions générales – Partie 1 : prescriptions applicables à toutes les installations*. Norme. 2004.

19.2 - Documents généraux

GICC. *Projet de recherche. Gestion territoriale du changement climatique. Une analyse à partir des politiques régionales. Rapport final* [en ligne]. 2007, vol. 1, 64 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <<http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/gicc/Rapport%20Final%20Bertrand%20Larrue%20-%20synthese.pdf>>

GICC. *Stratégies d'adaptation des ouvrages de protection marine ou des modes d'occupation du littoral vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des océans. Projet SAO POLO. Rapport* [en ligne]. Sous la direction de Sergent P. 2012, 119 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.gip-ecofor.org/doc/drupal/gicc/Sergent_Rapport_RF_2sept2012.pdf>

GIEC. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [en ligne]. Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. GIEC : Genève (Suisse), 2007, 103 p. [Consulté le 22.05.2015]. ISBN : 92-9169-222-0. Disponible à l'adresse : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf>

GIEC. *Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [en ligne]. Sous la direction de Stocker, T.F., et al. Cambridge (Royaume-Uni) et New York (État de New York, États-Unis d'Amérique) : Cambridge University Press, 2013, 27 p. [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_brochure_fr.pdf>

IPCC. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [en ligne]. Sous la direction de Field, C.B., et al. Cambridge (Royaume-Uni) et New York (État de New York, États-Unis d'Amérique) : Cambridge University Press, 2012, 582 p. ISBN : 978-1-107-02506-6 (hardback), 978-1-107-60780-4 (paperback). [Consulté le 22.05.2015]. Disponible à l'adresse : <http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All_FINAL.pdf>

Annexes

1 - Méthodologie de calcul des tendances climatiques et de définition des niveaux de confiance

Les intensités des évolutions projetées (tableaux 4, 5 et 6) pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 se basent sur les données du rapport de 2012 de l'expertise dirigée par Jean Jouzel [5], excepté pour l'indice d'humidité des sols, uniquement décrit dans le rapport 2011. Ce choix permet d'obtenir une valeur plus fine des moyennes minimales et maximales des intensités moyennes d'évolutions. En effet, le rapport 2012 fournit des données issues de 3 modèles au lieu de deux dans le rapport 2011. De même, trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols ont été utilisés pour un des modèles, au lieu de deux dans le précédent rapport : pour tous les modèles : A1B, scénario considéré comme « médian », ainsi que pour le modèle ALADIN : B1 plutôt « optimiste » et A2, plus « pessimiste ». Par ailleurs, les modèles utilisés dans ce dernier rapport ont une meilleure résolution que ceux du rapport 2011, d'où une meilleure représentation du climat moyen.

Ces projections ont visé à calculer la moyenne des écarts des valeurs moyennes minimales (respectivement maximales) des indices sur la période considérée et la valeur de référence, tous modèles et scénarios confondus. Elles donnent ainsi des indications sur les tendances globales des évolutions climatiques projetées, comme le met en évidence l'exemple ci-dessous.

T01 : Température quotidienne moyenne

		ALADIN	LMDZ	MAR
FRANCE				
1961-1990		10.3	10.2	10.3
2021-2050	B1	1.1/1.6 (0.6/2.1)		
	A1B	1.2/1.8 (0.7/2.5)	1.5/2.1 (0.7/3.0)	1.5/2.0 (0.4/2.6)
	A2	0.9/1.5 (-0.3/2.5)		
2071-2100	B1	1.7/2.3 (1.1/3.2)		
	A1B	2.7/3.4 (2.0/4.2)	3.6/4.1 (2.8/4.6)	2.2/2.7 (1.8/3.0)
	A2	3.6/4.3 (2.6/5.0)		

Figure 27 : Exemple de prévision climatique. Source : Peings Y., et al., 2012 [5].

Dans le cas de cet exemple, pour la période 2021-2050, l'indice T01 est susceptible d'augmenter entre 1,2 et 1,8 °C. Les calculs ont été les suivants :

Évolution moyenne minimale = Σ écarts entre la valeur moyenne minimale de l'indice pour 2021-2050 et la valeur de référence pour les modèles ALADIN (moyenne pour tous les scénarios), LMDZ et MAR

$$= [(1,1 + 1,2 + 0,9)/3 + 1,5 + 1,5] / 3$$

$$= 1,4$$

Évolution moyenne maximale = Σ écarts entre la valeur moyenne maximale de l'indice pour 2021-2050 et la valeur de référence pour les modèles ALADIN (moyenne pour tous les scénarios), LMDZ et MAR

$$= [(1,6 + 1,8 + 1,5)/3 + 2,1 + 2,0] / 5$$

$$= 1,9$$

En conclusion, les calculs indiquent que, pour la période 2021-2050, l'indice T01 tendra à augmenter entre 1,4 et 1,9 °C.

Par ailleurs, un niveau de confiance de la tendance d'évolution a été défini de la façon suivante :

- pour les indices dont les évolutions moyennes minimale et maximale n'ont pas le même signe, le niveau de confiance ne peut pas être déterminé ;
- pour les indices dont les évolutions moyennes minimale et maximale ont le même signe, le niveau de confiance de la tendance à l'augmentation ou à la diminution a été défini de la façon suivante : pour l'évolution moyenne minimale (respectivement maximale), deux points ont été attribués si l'ensemble des valeurs moyennes des indices minimaux (respectivement maximaux) ont le même signe ; un point si une de ces valeurs n'a pas le même signe que les autres, zéro point sinon. Les points obtenus pour les évolutions moyennes minimale et maximale sont additionnés et présentés dans le tableau.

Par exemple, pour l'indice T01 sur la période 2012-2050, il vient :

- évolution moyenne minimale : Aladin B1 : 1,1 / Aladin A1B : 1,2 / Aladin A2 : 0,9 / LMDZ A1B : 1,5 / MAR A1B : 1,5. Tous les nombres ont le même signe, 2 points sont donc attribués pour l'évolution moyenne minimale ;
- évolution moyenne maximale : Aladin B1 : 1,6 / Aladin A1B : 1,8 / Aladin A2 : 1,5 / LMDZ A1B : 2,1 / MAR A1B : 2,0. Tous les nombres ont le même signe, 2 points sont donc attribués pour l'évolution moyenne maximale.

Le niveau de confiance est donc de 4/4.

Il a été choisi de ne pas pondérer les points attribués pour le calcul de la tendance, puisqu'il ne s'agit pas d'obtenir une plage de valeurs mais un indice de confiance. Ainsi tous les scénarios ont été pris en compte au même niveau.

2 - Méthodologies détaillées d'analyse des référentiels techniques

2.1 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels routiers (DTecITM)

Cette méthode a été utilisée par la DTecITM (Cerema).

Les référentiels ont été recensés par le biais de requêtes réalisées sur le portail documentaire de la DTRF (Documentation Technique Routière Française), à partir de mots clés correspondant à des variables climatiques susceptibles d'évoluer.

Les tableaux ci-dessous présentent le nombre de documents recensés dans la base documentaire DTRF pour des recherches par mots clés dans les notices et en texte plein. Les documents pris en compte sont les textes officiels, les normes et les documents techniques.

Mots clés	Nombre de références recensées dans la DTRF	
	dans notice	en texte intégral
indice de gel	0	13
vent	23	358
vitesse de vent	1	18
force de vent	0	3
température	27	336
gradient de température	1	8
canicule	0	1
pluie	51	226
eau pluviale	39	43
pluviométrie	0	22
crue	16	112
inondation	16	101
assainissement + routier	20	170
gel	25	203
dégel	19	92
cycle gel-dégel	2	3
climat	21	135
neige	47	137
niveau d'eau	2	52
température extérieure	0	23
ensoleillement	0	33
UV	0	33
rayonnement	5	54
ensoleil* uv rayonnem* gel vent tempér* pluie pluviom* crue inondation canicule dégel neige climat (OU)	180	858

Tableau 15 : Requête dans la DTRF des référentiels routiers ayant des variables climatiques. Source : Cerema.

La requête du 6 septembre 2011 a utilisé les mots clés suivants : ensoleil* uv rayonnem* gel vent tempér* pluie pluviom* crue inondation canicule dégel neige climat (OU) (texte officiel, norme, document technique) (en texte plein + notice). Elle a fourni 858 résultats.

Une requête complémentaire du 13 avril 2012, à l'aide des mots clés : cyclone, « niveau d'eau », submersion, extrême, chaleur (OU) (texte officiel, norme, document technique) (en texte plein + notice), a fourni 336 résultats.

Mots clés	Nombre de références recensées dans la DTRF	
	dans notice	en texte intégral
Cyclone	9	0
Niveau d'eau	0	53
Submersion	0	17
Extrême	0	182
Chaleur	10	87
Cyclone « niveau d'eau » submersion extrême chaleur (OU)	10	336

Tableau 16 : Nombre de références à des variables climatiques trouvées dans la DTRF. Source : Cerema.

La liste des référentiels extraits grâce à ces requêtes a ensuite été complétée, par les documents non trouvés par les requêtes et par les normes quand cela a été possible. Les documents techniques en cours d'actualisation ou qui viennent de sortir ont notamment été ajoutés dans les différents domaines. Pour le domaine des techniques routières, le travail de tri des référentiels techniques a été réalisé par la DTer de Lyon (Caroline Mauduit) dans le cadre d'une étude du PCI Territoire et changement climatique.

2.2 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels spécifiques aux ouvrages urbains

Cette méthode a été utilisée par la DTecTV (Cerema).

Une recherche dans la base de données de la DTRF a été menée pour les ouvrages édités par la DTecTV. Cette recherche a permis d'identifier des guides techniques se rapportant éventuellement à la conception de la voirie urbaine et de façon plus marginale aux domaines de l'exploitation et de l'entretien.

Par ailleurs, il existe un corpus de normes rattaché à la commission CTCHU (chaussées urbaines) qu'il convient d'ajouter à cet inventaire.

La DTecTV a entrepris la démarche suivante :

- dans un premier temps, une recherche par mots clés « climatiques » a été menée sur l'ensemble des documents DTecTV. Néanmoins, après tri, il est apparu que ce type de requête ne semblait pas pertinent. Aussi il a été décidé de procéder à une sélection plus pragmatique des documents en lien avec l'expérience des chargés d'études ;
- la liste des référentiels utilisés au sein de la DTecTV pour la conception, l'entretien et l'exploitation des ouvrages urbains a donc été ensuite établie. Un inventaire sous forme de tableur a été effectué au sein du département Voirie de la DTecTV en croisant les informations issues de l'ensemble des chargés d'études et les données de la DTRF afin de balayer les référentiels utilisés susceptibles d'être impactés ;
- enfin, un tri des documents recensés a été effectué. Les documents utilisés pour le dimensionnement d'infrastructures urbaines ont été conservés si leurs recommandations pouvaient être impactées par le changement climatique. Par ailleurs, cet ensemble de documents a été complété par des guides traitant de la gestion de crise pouvant évoluer pour tenir compte tenu d'une augmentation de la fréquence des événements extrêmes.

2.3 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels liés aux ouvrages d'art routiers

Cette méthode a été utilisée par la DTecITM (Cerema).

Dans le domaine des ouvrages d'art routiers, les documents de référence sont les normes européennes. Les règlements relatifs à la conception, au dimensionnement et à la justification des structures de génie civil ainsi que ceux qui concernent l'emploi des matériaux et produits de construction font référence à cette normalisation. Les paramètres climatiques sont définis dans ces normes et, le cas échéant, dans leurs annexes nationales.

Pour les ouvrages d'art existants, les opérations de maintenance ou de renforcement ne sont pas encore complètement couvertes par une normalisation européenne actualisée. Les projets correspondant adoptent, dans toute la mesure du possible, les actions climatiques des normes européennes, ou d'autres sources d'informations jugées pertinentes, quand elles diffèrent de manière défavorable des valeurs qui avaient été utilisées lors de la construction.

Les documents qui n'ont pas un caractère réglementaire ou normatif, tels que des guides techniques, ne définissent pas de valeurs quantifiées. Ils ne sont donc pas à prendre en compte dans les référentiels susceptibles d'être actualisés.

2.4 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels spécifiques aux tunnels

Cette méthode concerne le CETU.

Concernant les tunnels, une bonne partie des référentiels sont communs entre tunnels et ouvrages d'art plus classiques. Par ailleurs, il n'a pas été identifié de référentiels spécifiques aux tunnels pouvant présenter un enjeu vis-à-vis du changement climatique.

2.5 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels ferroviaires

Cette méthode a été utilisée par RFF et la SNCF.

Dans le cadre des projets d'investissement menés sous la maîtrise d'ouvrage (directe ou en mandat) de RFF, divers textes techniques sont applicables :

- spécifications techniques d'interopérabilité (STI) ;
- lois et règlements français (ainsi que arrêtés, décrets, instructions techniques interministérielles et circulaires) ;
- normes européennes ;
- normes françaises ;
- fiches UIC (Union Internationale des Chemins de fer) ;
- guides à usage de recommandation (GEFRA, DTecITM...) ;
- textes spécifiques au Réseau Ferré National : référentiels de conception et d'entretien, textes pour la plupart de type « IN » pour référentiel Infrastructure ;

Le recensement des référentiels spécifiquement ferroviaires a été réalisé à dire d'expert. Les textes liés aux ouvrages d'art par exemple sont du ressort du Génie Civil et demanderont une étude spécifique.

2.6 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels maritimes et fluviaux

Cette méthode a été utilisée par la DTecEMF (Cerema).

En ce qui concerne les ouvrages suivis par la DTecEMF (ouvrages portuaires et ouvrages fluviaux de navigation), il n'existe pas à proprement parler de base de données telle que la DTRF.

La DTecEMF a donc entrepris la démarche suivante :

- dans un premier temps : établir la liste des référentiels utilisés pour la conception, l'entretien et l'exploitation des ouvrages maritimes et fluviaux. Un inventaire sous forme de tableur a été effectué au sein du département multimodalité de la DTecEMF en consultant l'ensemble des chargés d'études infrastructures afin de balayer l'ensemble des référentiels utilisés pouvant être impactés ;
- dans un deuxième temps, un tri des documents recensés a été effectué afin de retirer les référentiels qui ne sont pas impactés par le changement climatique. Ce tri a été effectué en excluant les référentiels pour lesquels les variables climatiques ne sont pas évoquées ou dans lesquels la variable climatique est mentionnée sans « jouer » sur le dimensionnement ou les prescriptions formulées.

Cette méthode reste toutefois subjective, car seuls les référentiels DTecEMF ou référentiels couramment utilisés par les chargés d'études ont été retenus. Néanmoins, les documents essentiels recommandés ou utilisés par la DTecEMF ont été balayés.

2.6.1 - Pour les ouvrages maritimes

Un recueil des documents de références pour les ouvrages maritimes a été établi par la DTecEMF en 2004. Il a servi de base pour l'établissement de la liste de référentiels. Ont été retirés de l'analyse des référentiels DTecITM mentionnés dans ce recueil, en partant du principe qu'ils ont été étudiés par la DTecITM.

Ce recueil a ensuite été complété et actualisé afin de prendre en compte les évolutions de la normalisation, en particulier la publication des Eurocodes (les Eurocodes sont d'application pour toutes les thématiques, par exemple : en mécanique des sols) et des normes d'application nationale.

2.6.2 - Pour les ouvrages de navigation

En l'absence de recueil de données, un listing a été établi afin de recenser les référentiels utilisés par les différents chargés d'étude de la DTecEMF. Il convient donc de considérer que le tableau final dresse la liste la plus exhaustive possible à prendre en compte pour la conception, l'entretien et l'exploitation des ouvrages fluviaux de navigation.

2.6.3 - Le cas particulier des règlements d'exploitation

Les règlements d'exploitation pourraient également être impactés par des modifications du climat mais étant donné le nombre d'exploitants, la diversité des règlements et le peu d'informations à disposition sur le sujet, ils ne font pas l'objet de cette analyse.

2.7 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels aéroportuaires

Cette méthode a été utilisée par le STAC.

En ce qui concerne les ouvrages aéroportuaires, le recensement des documents relatant des données climatiques a été réalisé sur la base d'une analyse de référentiels internationaux relevant de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), de référentiels européens relevant du Comité Européen de Normalisation (CEN) et de référentiels nationaux relevant de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC). Cette analyse a été menée via une recherche par mots-clés. Ces mots-clés sont les mêmes que ceux utilisés pour le domaine routier.

Pour les référentiels internationaux, trois types de textes ont pu être identifiés :

- la convention de Chicago ;
- les annexes à la Convention, constituées de :
 - normes et pratiques recommandées (SARPS) ;
 - suppléments (les différences notifiées par les États font l'objet d'un supplément particulier) ;
 - PANS (procedure for air navigation services) ;
- les éléments indicatifs constitués principalement de :
 - manuels ;
 - circulaires.

Pour l'analyse des référentiels européens, une liste de normes relatives aux produits utilisés pour la conception des chaussées aéroportuaires a été utilisée. Ces normes sont référencées dans le tableau des référentiels aéroportuaires, mais il est possible que cette liste évolue à l'avenir.

L'analyse des référentiels nationaux a été basée sur le guide d'application des normes relatif aux enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques [35] et le rapport relatif à l'adhérence sur pistes contaminées [36] qui ont été édités par le Service Technique de l'Aviation Civile, ainsi que sur l'Instruction Technique sur les Aérodrômes Civils (ITAC) [39].

2.8 - Méthode de recensement des données climatiques dans les référentiels spécifiques aux transports guidés

Cette méthode a été utilisée par le STRMTG.

Le STRMTG ne dispose pas de base de données exhaustive unique des documents techniques, textes de loi et normes recouvrant l'ensemble des systèmes suivis par le service (Remontées Mécaniques, Transports guidés Urbains, Chemins de Fer Secondaires et Chemins de Fer Touristiques / Cyclo-Draisines).

Un inventaire des référentiels techniques élaborés par le STRMTG a été réalisé et complété par les documents réglementaires en vigueur, directement en lien avec les activités du service.

Cet inventaire a été étendu dans un deuxième temps aux documents normatifs utilisés. Cette recherche a été réalisée sur la base d'un balayage des documents disponibles sur le réseau informatique du service, après interrogation des responsables systèmes concernés ou de leurs agents. Une partie des documents recensés a été écartés sur la base de leur intitulé sans grand risque d'erreurs possibles. Les documents restants ont donné lieu à une recherche par mot clé quand cela s'est révélé possible. Les documents ne permettant pas une recherche informatique par mot clé, du fait de leur format, ont été rapidement balayés via le sommaire et une lecture rapide. Pour chaque document recensé comme susceptible d'être affecté par la modification d'une variable climatique, cette variable a été identifiée. La recherche par mot clé a été réalisée sur la base de la liste suivante : gel, givre, température, neige, vent, pluie, foudre, inondations*, extrêmes* ainsi que ponctuellement : éboulement, glissement de terrain, en fonction du système de transport et du document considéré.

Il est important de noter que les systèmes qui entrent dans le champ de compétence du STRMTG couvrent des domaines d'activité peu normés en ce qui concerne leur sensibilité aux variables climatiques. Ceci est valable notamment pour le volet TG, mais moins en RM, dont les guides techniques relatifs à la conception, l'exploitation et la maintenance comportent des seuils relatifs aux charges climatiques à prendre en compte (références notamment aux Eurocodes)¹⁶.

¹⁶Un toilettage normatif est en cours, notamment sur la NF EN 12929-1 « Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Dispositions générales – Partie 1 : Prescriptions applicables à toutes les installations » [40]. Il n'est pas prévu dans le cadre des réflexions en cours, de revoir les valeurs de pression de vents actuellement définies.

Le résultat du travail décrit ci-dessus ne peut constituer la seule référence. C'est principalement dans les documents d'exploitation et / ou dans les documents réglementaires liés à la construction du réseau ou de l'appareil, que les variables climatiques et leur impact sur le système de transport sont prises en compte le cas échéant. Par exemple :

- en transports guidés urbains, pour l'aspect pluie / inondation, le DS (Dossier de Sécurité) définit les points bas du réseau et la hauteur d'eau maximale associée acceptable avant un arrêt du système, ou tout du moins la mise en place de consignes d'exploitation dégradées ;
- en ce qui concerne la prise en compte du vent en RM, les constructeurs s'accordent pour définir une vitesse maximale au-delà de laquelle un transport par câble (système X ou Y) ne peut pas fonctionner dans des conditions acceptables – y compris pour le confort des usagers (selon système, 70/90/110 km/h). C'est le règlement d'exploitation de l'exploitant ou parfois simplement la pratique, qui définit localement les seuils maximums acceptables avant arrêt.

3 - Synthèse des méthodologies et de la répartition de l'analyse des référentiels

Le tableau ci-dessous (tableau 17) synthétise les méthodologies de recensement des référentiels utilisées par type d'infrastructure. Il précise également quel service a réalisé le listing et établi les demandes de projections climatiques, pour un type d'infrastructure donné.

	Méthodologie de recensement des référentiels		Listing de référentiels établi par	Demandes de projections climatiques établies par
	Recherche sur base documentaire complétée par dires d'experts	Recherche par dires d'experts		
Domaine routier	x		Cerema	Cerema
Ouvrages urbains	x		Cerema (DTecTV)	
Ouvrages d'art routiers	x		Cerema (DTecITM)	Cerema (DTecITM)
Tunnels	x		CETU	CETU
Domaine ferroviaire		x	RFF et SNCF	RFF et SNCF, en lien avec le STRMTG
Domaine fluvial et maritime		x	Cerema (DTecEMF), VNF	Cerema (DTecEMF), VNF
Domaine aéroportuaire		x	STAC	STAC
Domaine spécifique aux remontées mécaniques et transports guidés		x	STRMTG	STRMTG

Tableau 17 : Tableau de synthèse des méthodologies de recensement et des services impliqués dans le listing des référentiels et des demandes de projections, par type d'infrastructure. Source : Cerema.

4 - Liste des référentiels

4.1 - Catégories de documents

Les documents issus de l'analyse des référentiels ont été classés en 3 catégories définies ci-dessous (colonne « catégorie ») :

- catégorie n°1 : référentiel technique non impacté par le changement climatique, mais abordant des notions climatiques ;
- catégorie 2 : référentiel technique impacté par les évolutions climatiques et nécessitant d'ores et déjà une révision technique (modifications réglementaires, actions de normalisation ...) ;
- catégorie 3 : référentiel technique pour lequel il est indispensable d'obtenir des précisions sur les variables ou paramètres climatiques afin de déterminer s'ils doivent ou non être révisés et de quelle manière.

Les documents recensés ont ensuite été classés selon trois grands thèmes correspondant à la construction, à l'entretien et à l'exploitation (colonne « thèmes »).

4.2 - Référentiels routiers

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Route – Environnement : bruit								
Arrêté du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières	1	05/1995	Texte officiel – Arrêté	Route	Notions de météorologie	x		
Circulaire n°97 – 110 du 12 décembre 1997 relative à la prise en compte du bruit dans la construction de routes nouvelles ou l'aménagement de routes existantes du réseau national	1	12/1997	Texte officiel – Circulaire	Route	Vent, température	x		
Bruit et études routières – Manuel du chef de projet	1	10/2001	Document technique Guide technique	Route	Notions de météorologie	x		
Comment réaliser les cartes de bruit stratégiques en agglomération – Mettre en œuvre la directive 2002/49/CE	1	07/2006	Document technique – Guide méthodologique	Route	Notions de météorologie	x		
Production des cartes de bruit stratégique des grands axes routiers et ferroviaires – Guide méthodologique	1	08/2007	Document technique – Guide méthodologique	Route	Occurrences de conditions météorologiques	x		
Écrans (les) acoustiques – Guide de conception et de réalisation	1	12/2007	Document technique – Guide technique	Route	Notions de météorologie	x		
Prévision du bruit routier – 2 – Méthode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques (NMPB 2008)	1	06/2009	Document technique – Guide technique	Route				
NF S 31-133:2011 Acoustique – Bruit dans l'environnement. Calcul de niveaux sonores	1	2011	Norme	Route	Vent, taux d'humidité, occurrences de conditions météorologiques			

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Route – Environnement : paysage								
Végétalisation (la) : la végétation, outil d'aménagement – Guide technique	1	03/1994	Document technique Guide technique	Route	Carte des zones bioclimatiques françaises, température, gel. L'évolution des conditions climatiques peut influencer le choix du type de végétation	x		
Cahier des clauses techniques générales – Fascicule 35 – Aménagements paysagers. Aires de sports et de loisirs de plein air	1	04/1999	Texte Officiel – CCTG	Route	Gel, neige, température, vent, précipitations, brouillard, etc. Les conditions météorologiques peuvent entraîner des arrêts de chantier	x		
Nouveau (le) fascicule 35 du CCTG. Aménagements paysagers – Aires de sports et de loisirs de plein air. Apports et conseils d'utilisation	1	07/1999	Document technique – Fiche et note d'information	Route	Gel, neige, température, vent, précipitations, brouillard, etc. Les conditions météorologiques peuvent entraîner des arrêts de chantier	x		
Insertion d'une infrastructure routière – Concilier terrassements et enjeux paysagers	1	06/2008	Document technique – Fiche et note d'information	Route	Neige. Les objectifs de végétalisation d'un talus peuvent être en lien avec les conditions climatiques	x		
Paysage et infrastructures de transport - Guide méthodologique	1	06/2008	Document technique Guide technique	Route	Les conditions climatiques sont à prendre en compte dans la réflexion d'aménagement paysager	x		
Insertion d'une infrastructure de transport – Concilier assainissement et enjeux de paysage	1	09/2009	Document technique – Fiche et note d'information	Route	Pluie. Le choix du type d'ouvrage d'assainissement est conditionné par les conditions pluviométriques	x	x	
Route – Environnement : qualité de l'air								
Circulaire n° 98-36 du 17 février 1998 relative à l'application de l'article 19 de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie complétant le contenu des études d'impact des projets d'aménagement	1	17/02/1998	Texte Officiel – Circulaire d'application	Route	Les conditions météorologiques influencent la dispersion des polluants. Si elles sont modifiées la dispersion peut l'être également			
Décret n° 2002-213 du 15 février 2002 portant transposition des directives 1999/30/CE du Conseil du 22 avril 1999 et 2000/69/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 novembre 2000 et modifiant le décret n° 98-360 du 6 mai 1998 relatif à la surveillance	1	15/02/2002	Texte Officiel – Décret	Route	Conditions météo influencent la dispersion des polluants ; « événements naturels » les événements suivants : éruptions volcaniques, activités sismiques, activités géothermiques, feux de terres non cultivées, vents violents ou remise en suspension atmosphérique			
Protections acoustiques : enjeux et modalités d'insertion dans le paysage	1	09/2009	Document technique Fiche et note d'information	Route	Les conditions climatiques influencent l'entretien et le vieillissement de la protection acoustique choisie	x		

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Route – Environnement : risques naturels / eau								
Circulaire n° 12 du 28 février 1967 relative à la défense des intérêts de l'État dans les affaires contentieuses consécutives à des accidents sur les routes nationales		28/02/1967	Texte Officiel – Circulaire	Route	Notion de phénomènes atmosphériques exceptionnels	x		
Loi n°2004-811 du 13 août 2004 de modernisation de la sécurité civile	1	22/07/1987	Texte Officiel – Loi	Route	Incendie, inondations			x
Circulaire du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables	1	24/01/1994	Texte Officiel – Circulaire	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée	x		
Circulaire du 24 avril 1996 relative aux dispositions applicables au bâti et ouvrages existants en zones inondables	1	24/04/1996	Texte Officiel – Circulaire	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée	x	x	
Circulaire du 12 mars 1996 relative à la préservation et à la restauration des zones d'expansion des crues	1	03/12/1996	Texte Officiel – Circulaire	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée	x	x	
Décret n° 2001-260 du 27 mars 2001 modifiant le code de l'urbanisme et le code de l'expropriation pour cause d'utilité publique et relatif aux documents d'urbanisme	1	27/03/2001	Texte Officiel – Décret	Route	La notion de "projet d'utilité publique" couvre les projets liés à la prévention des risques	x		
Décret n° 2002-202 du 13 février 2002 modifiant le décret n° 93-743 du 29 mars 1993 relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau	1	13/02/2002	Texte Officiel – Décret	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées la portée de ce document sera modifiée	x		
Circulaire du 30 avril 2002 relative à la politique de l'État en matière de risques naturels prévisibles et de gestion des espaces situés derrière les digues de protection contre les inondations et les submersions marines	1	30/04/2002	Texte Officiel – Circulaire	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée. Fait référence aux risques de submersion, niveaux de submersion issus de la note de l'ONERC de 2010 : à modifier si de nouvelles hypothèses de submersion sont définies en 2100	x		

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Arrêté du 27 juillet 2006 modifiant l'arrêté du 13 février 2002 fixant les prescriptions générales applicables aux installations ou ouvrages soumis à déclaration en application des articles L.214-1 à L.214-6 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 2.5.4 (2° et 3°) de la nomenclature annexée au décret n°93-743 du 29 mars 1993 modifié	1	27/07/2002	Texte Officiel – Arrêté	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée	x	x	
Loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages	1	30/07/2003	Texte Officiel – Loi	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée	x		
Circulaire du 21 janvier 2004 relative à la maîtrise de l'urbanisme et adaptation des constructions en zone inondable	1	21/01/2004	Texte Officiel – Circulaire	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée	x		
Instruction jointe à la circulaire du 22 novembre 2004 relative à la concertation entre les services de l'environnement et les services de l'équipement pour l'élaboration et l'instruction des projets routiers du réseau national	1	22/11/2004	Texte Officiel – Circulaire	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée	x		
Décret n° 2006-881 du 17 juillet 2006 modifiant le décret n° 93-743 du 29 mars 1993 relatif à la Nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application de l'article 10 de la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau et le décret	1	17/07/2006	Texte Officiel – Décret	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées la portée de ce document sera modifiée	x		
Article R.214-1 du code de l'Environnement	1	04/07/2014	Texte Officiel – Loi	Route	Fait référence aux zones inondables. Si celles-ci sont modifiées, la portée de ce document sera modifiée	x		
Instruction jointe à la circulaire du 29/04/2014 technique relative aux modalités d'élaboration des opérations d'investissement et de gestion sur le réseau routier national	1	06/02/2015	Texte officiel – Circulaire	Route	Fait référence aux zones inondables et aléas. S'ils sont modifiés, la portée de ce document sera modifiée	x		
Instruction jointe à la circulaire du 29/04/2014 technique relative aux systèmes de management de / par la qualité dans les services routiers	1	06/02/2015	Texte officiel – Circulaire	Route	Fait référence aux zones inondables et aléas. S'ils sont modifiés, la portée de ce document sera modifiée	x		

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Route – Chaussée : dimensionnement								
NF P 98-086 : Dimensionnement des structures de chaussées routières. DOCUMENT EN COURS DE REVISION	2		Norme – Norme Homologuée	Route – Chaussée	Indice de gel, température	x		
Conception et dimensionnement des structures de chaussée – Guide technique	1	1994	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Ensoleillement, rayonnement, gel-dégel, température, pluie, pluviométrie, indice de gel, drainage, assainissement	x		
Lettre-circulaire du 26 octobre 1998 concernant l'application du catalogue des structures types de chaussées neuves	1	26/10/1998	Texte Officiel – Circulaire	Route – Chaussée	Indice de gel / dégel	x		
Catalogue des structures types de chaussées neuves. Réseau routier national	3	10/1998	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Indice de gel / dégel, température	x		
Chaussées en béton – Guide technique	3	03/2000	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Drainage, indice de gel, vent, température, pluie (intensité en mm/an)	x		
Chaussées neuves à faible trafic – Manuel de conception. DOCUMENT EN COURS DE REVISION	3	07/1981	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Assainissement, drainage, indice de gel.	x		
Dimensionnement des structures des chaussées urbaines	1	04/2000	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Pluviométrie, gel / dégel, températures, gradients thermiques	x	x	
Construction des chaussées neuves sur le réseau routier national. Spécifications des variantes – Guide technique	3	2003	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Indice de gel / dégel	x		
Dimensionnement des renforcements de chaussées souples – Guide technique. DOCUMENT EN COURS DE REVISION	1	06/1978	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Gel / dégel, drainage	x		
Actualisation du guide technique dimensionnement des renforcements de chaussées souples – Guide technique DOCUMENT EN COURS DE REVISION	3	01/04/1988	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Indice de gel		x	
Renforcements en enrobés à module élevé en traversée d'agglomération – Guide technique	3	11/1988	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Indice de gel / dégel	x		
Retraitement en place à froid des anciennes chaussées – Guide technique	1	07/2003	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Gel / dégel, vent, pluie	x		
Entretien des chaussées urbaines – Guide méthodologique et pratique	3	04/01/2010	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Indice de gel-dégel, neige, cycle de température		x	x

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Guide technique – Entretien des chaussées en béton – chaussées routières et aéronautiques	1	2002	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Eau, température		x	
Dictionnaire de l'entretien routier. Thème 1 : organisation des services de l'Équipement Thème 2 : généralités de la route. Thème 3 : chaussées	1	1996	Document technique – Dictionnaire – Glossaire	Route – Chaussée	Gel / dégel, température, pluviométrie, neige, indice de gel		x	
Route – Chaussée : matériaux								
Enrobés hydrocarbonés à chaud – guide d'application des normes pour le réseau routier national	3	12/1994	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	UV, vent, température, pluie, moyenne des températures maximales sur juillet / août, moyenne des températures minimale sur janvier / février	x		
Enrobés drainants – Note d'info n°100	3	1997	Document technique – Fiche et note d'information	Route – Chaussée	Gel, température, pluie, neige, zone climatique Hi	x	x	
Enduits superficiels d'usure – Guide technique	1	05/1995	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Ensoleillement, gel, vent, température, pluie	x	x	
Aide au choix des techniques d'entretien des couches de surface des chaussées – Guide technique. DOCUMENT EN COURS DE REVISION	1	2003	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Vent, température, pluviométrie, neige		x	
Cahier des clauses techniques générales – Fascicule 62 – Titre I – Section I – Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites – BAEL 91 révisé 99	1	15/02/1999	Texte Officiel – CCTG	Route	Vent, température, neige, climat, charges climatiques	x		
Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des assises de chaussées – Guide technique	1	2007	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Gel, pluie, climat, température, vent	x		
Application des nouvelles normes assises de chaussées NF EN 14227 – Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications. Note CFTR n°15	1	2007	Document technique – Fiche et note d'information	Route – Chaussée	Eau	x		
Assises de chaussées en graves non traitées et matériaux traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques – Guide d'application des normes pour le réseau routier national	3	12/1998	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	Indice de gel, conditions météorologiques, vent, température, pluie	x		

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Cahier des clauses techniques générales – Fascicule 25 – Exécution des corps de chaussées. DOCUMENT EN COURS DE REVISION	1	16/05/1996	Texte Officiel – CCTG	Route – Chaussée	Gel / dégel, vent, température, pluie, crue, nombre de jours de gel, nombre de jours de hauteur d'eau dépassant un seuil	x		
Plates-formes du tramway – Pathologie et conception – Tome 2 : Matériaux non modulaires	1	2009	Document technique – Guide technique	Route	Indice de gel, gel / dégel, vent, pluie, pluviométrie, neige	x		
Entretien préventif du réseau routier national. Aide au choix des solutions d'entretien – Guide technique	1	01/09/1990	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée			x	
Choix d'une couche de roulement. Performance, coût global	1	04/1994	Document technique – Guide technique	Route – Chaussée	UV, vent, température, pluie, crue	x		
Cahier des clauses techniques générales – Fascicule 27 – Fabrication et mise en œuvre des enrobés hydrocarbonés. DOCUMENT EN COURS DE REVISION	1	05/10/1996	Texte Officiel – CCTG	Route – Chaussée	Nombre de jours de gel, vent, température, pluie, nombre de jours de crue	x		
Enduits superficiels d'usure (Esu) – Enrobés coulés à froid (Ecf) – Actualisation des connaissances sur les revêtements superficiels (NI Chaussées Dépendances 113)	1	04/2005	Document technique – Note d'information	Route – Chaussée	Ensoleillement, gel, vent, température, pluie	x	x	
Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel – Guide technique	3	12/01/2003	Document technique – Guide technique	Route	Gel / dégel, vent, pluie, neige	x	x	
Route – Assainissement								
Structures (Les) alvéolaires ultra légères (SAUL) en assainissement pluvial	1	1998	Document technique – Guide technique	Route – Assainissement	Pluie, pluviométrie locale, débit de pointe, débit décennal	x	x	
Ouvrages routiers et inondations	3	1998	Document technique Fiche et note d'information	Route – Assainissement	Débits de pointe de référence	x		
Bilan financier prévu par la circulaire n° 94-56 du 5 mai 1994 définissant les modalités d'élaboration, d'instruction et d'approbation des opérations d'investissements sur le réseau routier national non concédé – Guide technique	2	2001	Document technique – Guide technique	Route – Assainissement	Neige, gel	x		
Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques	2	30/12/2006	Texte officiel Loi	Route – Assainissement				

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Assainissement routier – Guide technique	3	2006	Document technique – Guide technique	Route – Assainissement	Inondation, submersion, période de retour, débit exceptionnel, hauteur d'eau, débit de pointe pour une période de retour donnée, intensité moyenne (mm/h), coefficient de ruissellement, pluie journalière décennale ou autre période de retour, temps de concentration, climatologie	x		
Guide technique – Drainage routier	1	2006	Document technique – Guide technique	Route – Assainissement	Gel / dégel, vent, température, pluie, humidité, coefficient d'infiltration en % des hauteurs de pluies, hauteur et durée de précipitation, zone climatique	x	x	x
Pollution d'origine routière – Conception des ouvrages de traitement des eaux – Guide technique	3	2007	Document technique – Guide technique	Route – Assainissement	Pluviométrie, pluie, période de retour, rigueur de l'hiver, hauteur d'eau de période de retour de 10 ans, durée 2 heures, hauteur d'eau limitée à une période de retour d'un an, durée 2 heures. En annexe : hauteur d'eau en m de l'événement de pointe, hauteur de pluie moyenne annuelle en m, occurrence et niveau des crues centennales et décennales (débits et fréquences)	x	x	x
Assainissement (I ^a) pluvial intégré dans l'aménagement – Éléments clés pour le recours aux techniques alternatives	1	2008	Document technique – Guide technique	Route – Assainissement	Débit de référence, fréquence d'inondation, débit décennal, hauteur maximale annuelle courbe intensité / durée / fréquence	x		
Route – Terrassements								
Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) – Guide technique	1	1992	Document technique – Guide technique	Route – Terrassements	Gel / dégel , vent, hauteur ou intensité de pluie, érosion pluviale, météorologie	x		
Guide technique : Conception et réalisation des terrassements – Fascicule 1 : études et exécution des travaux – Fascicule 2 : organisation des contrôles – Fascicule 3 : méthodes d'essais	1	2007	Document technique – Guide technique	Route – Terrassements	Gel, vent, pluie, pluviométrie, neige, inondation, soleil, érosion pluviale, zones climatiques, indice de gel	x		
Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS) – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme – Guide technique	3	2000	Document technique – Guide technique	Route – Terrassements	Gel / dégel, vent, pluie, pluviométrie, climat, température	x		
Météorologie et Terrassement. DOCUMENT EN COURS DE REVISION	3	1986	Document technique – Guide technique	Route – Terrassements	Évaporation précipitation, neige, brouillard, orage, gel, état hydrique du sol, vent	x		
Terrassements – Aide à la rédaction des CCTP – Guide méthodologique. DOCUMENT EN COURS DE REVISION	3	2006	Document technique – Guide technique	Route – Terrassements	Gel, vent, inondation, température, précipitation	x		

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Cahier des clauses techniques générales. Fascicule 2. Terrassements généraux	1	2003	Texte Officiel – CCTG	Route – Terrassements	Météorologie	x		
Portance des plates-formes : pertinence du choix d'une méthodologie de mesure	1	En cours	Document technique	Route – Terrassements				
Recommandations pour le diagnostic, l'entretien et la réhabilitation des remblais routiers	1	En cours	Document technique	Route – Terrassements			x	x
Étude et réalisation des remblais sur sols compressibles (Sétra et LCPC)	1	2000	Document technique – Guide technique	Route – Terrassements	Référence à des paramètres tels que : écoulement des eaux, teneur en eau, drainage, sans lien direct avec la météorologie / climatologie	x		
NF P98-080-1 : Chaussées – Terrassement – Terminologie – Partie 1 : terminologie relative au calcul de dimensionnement des chaussées	2	1992	Norme – Norme Homologuée	Route – Terrassements	Indice de gel, température	x		
Route – Signalisation verticale – PPHM								
Norme XP – P 98 – 550 – 1 Signalisation routière verticale – Portiques, potences et hauts mats – Partie 1 : spécifications de calcul, mise en œuvre, contrôle, maintenance, surveillance	1	08/1996	Norme	Route – Signalisation verticale – PPHM	Vent, neige, température. Document en lien avec les Eurocodes, pris en compte par le domaine des ouvrages d'arts	x	x	x
Route – Viabilité hivernale (VH)								
Anticipation des risques routiers hivernaux – Éléments de réflexion	1	09/2006	Document technique – Guide technique	Route – VH	Zonage climatique. Définition des niveaux de service hivernal. Neige, précipitation et froid			x
Comportement (le) hivernal particulier de certaines surfaces routières	1	04/1991	Document technique – Fiche et note d'information	Route – VH	Pas de référence à des variables climatiques			x
Dictionnaire de l'entretien routier. Thème 4 : viabilité hivernale	1	05/1998	Document technique – Dictionnaire – Glossaire	Route – VH	Pas de référence à des variables climatiques. Document méthodologique. Organisation du service hivernal			x
Dispositions particulières pour l'exploitation hivernale des bétons bitumineux drainants	3	09/2001	Document technique – Fiche et note d'information	Route – VH	Phénomènes météorologiques. Référence aux Hi : référentiel à modifier si le zonage Hi évolue			x
Élaboration d'une politique routière de maintenance par niveaux de service – Guide méthodologique	1	11/1994	Document technique – Guide technique	Route – VH	Pas de référence à des variables climatiques			x

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Fondants (les) chimiques : choisir un sel de déneigement	1	06/1989	Document technique – Fiche et note d'information	Route – VH	Caractéristiques, fonctionnement, efficacité des fondants. Pas de référence à des variables climatiques			x
Lettre-circulaire du 29 décembre 1994 et note d'orientation annexée sur les objectifs de qualité en viabilité hivernale sur le réseau routier national	1	29/12/1994	Texte Officiel – Lettre-circulaire	Route – VH	Calendrier d'élaboration des Documents d'Organisation de la Viabilité Hivernale			x
Lettre-circulaire du 31 octobre 1996 relative à la viabilité hivernale	1	31/10/1996	Texte Officiel – Lettre-circulaire	Route – VH	Pas de référence à des variables climatiques. Organisation, objectifs de qualité			x
Lutte contre les formations de congères sur les routes existantes : le point sur l'emploi des barrières à neige	1	10/1986	Document technique – Fiche et note d'information	Route – VH	Emploi des barrières à neige			x
NF P95-310 – Déclenchement artificiel – Équipements de protection contre les avalanches – Principes techniques généraux	1	12/1996	Norme – Norme Homologuée	Route – VH	Conditions d'exploitation particulières (vent, température)			x
NF P98-180 – Chlorure de sodium solide utilisé comme fondant routier – Service hivernal – Spécifications	1	07/2003	Norme – Norme Homologuée	Route – VH	Pas de référence à des variables climatiques			x
NF P99-320 – Recueil des données météorologiques et routiers – Météorologie routière	2	04/1998	Norme – Norme Homologuée	Route – VH	Définitions paramètres atmosphériques et phénomènes météorologiques. Classes de vent routier et classes de visibilité routière, à faire évoluer éventuellement (vocabulaire à modifier)			x
Organisation des patrouilles. Exploitation de la route – Guide technique	1	11/1999	Document technique – Guide technique	Route – VH	Pas de référence à des variables climatiques			x
Stockage (le) des fondants pour la viabilité hivernale – Guide technique	1	03/1992	Document technique – Guide technique	Route – VH	Remplacé par le guide « Stockage des fondants routiers : gestion et dimensionnement » (publication en cours)	x		x
Verglas, mode d'emploi !	1	02/1991	Document technique – Fiche et note d'information	Route – VH	Formation du verglas, impact chaussée			x
Viabilité hivernale – Approche globale – Fiches techniques	1	01/2010	Document technique – Fiche et note d'information	Route – VH	Déclinaison en fiches du document « Viabilité hivernale – Approche globale – Guide technique » (2009)			x
Viabilité hivernale – Approche globale – Guide méthodologique	1	02/2009	Document technique – Guide technique	Route – VH	Organisation du service hivernal			x
Viabilité hivernale – Stratégies de choix de raclage et d'épandage	1	12/2009	Document technique – Guide technique	Route – VH	Guide méthodologique. Équipements en VH (traitements neige, verglas). Température, précipitations : neige, influencent le choix du porteur et du type d'outils			x
Viabilité hivernale : protection contre les congères – Recommandation	1	09/1984	Document technique – Guide technique	Route – VH	Transport de la neige par le vent			x

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Route – Autres								
Arrêté du 8 septembre 2009 portant approbation du cahier des clauses administratives générales applicables aux marchés publics de travaux (et annexe : Cahier des clauses administratives générales applicables aux marchés publics – Travaux)	1	08/09/2009	Texte Officiel – Arrêté et CCAG	Route	Notions d'intempéries	x		
Dossier pilote des tunnels – Génie civil. Section 8 : chaussée	1	1997	Document technique – Guide technique	Route	Rayonnement, gel / dégel, température, pluie, indice de gel de référence	x		
Guide pour la conception générale du génie civil des tranchées couvertes	1	2002	Document technique – Guide technique	Route	UV, rayonnement, gel, vent, pluie, pluviométrie, crue, inondation, neige	x		
Prévention et stabilisation des glissements de terrain – Conception, mise en œuvre et maintenance des dispositifs	1	2010	Document technique – Guide technique	Route	Cycles gel / dégel, infiltration, eau, UV, pluie, pluviométrie, sécheresse, humidification	x		

Tableau 18 : Référentiels routiers catégorisés. Source : Cerema.

4.3 - Référentiels de voiries urbaines

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
STRUCT- URB – Dimensionnement des chaussées neuves	CERTU	1	2005	Logiciel	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		
Usage des surfaces podotactiles par les personnes aveugles ou malvoyantes	CERTU – DSCR	1	2005	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		
Plan de gestion du trafic périurbain – Guide méthodologique	CERTU – DSCR	1	2007	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation			x
Chaussées urbaines démontables – Guide technique 2008	CERTU – LCPC – CIMBETON	1	2009	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation			x
Profil en travers, outil du partage des voiries urbaines	CERTU	1	2009	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		
Instructions sur les conditions techniques d'aménagement des voies rapides urbaines (ICTAVRU)	CERTU	1	2009	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		
Guide sur le marquage de la chaussée en agglomération	CERTU	1	2004	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		
Chaussées bus : Choix des matériaux et dimensionnement structurel	CERTU	1	2006	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		
Entretien des chaussées urbaines – Guide méthodologique et pratique	CERTU	1	2010	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation		x	

Sols (les) stabilisés en milieu urbain – Conception, choix des matériaux, mise en œuvre et entretien	CERTU	1	2009	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x	x	
Recommandations pour les aménagements cyclables – version mise à jour en septembre 2008	CERTU	1	2008	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x	x	
Chaussées poreuses urbaines – Guide technique	CERTU	1	1999	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		
Dimensionnement des structures des chaussées urbaines	CERTU	1	2000	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		
Conception des accès sur voies rapides urbaines de type 4 (VRU A)	CERTU	1	2003	Guide technique	Voirie urbaine	Température, neige, précipitation	x		

Tableau 19 : Référentiels de voiries urbaines catégorisés. Source : Cerema.

4.4 - Référentiels ouvrages d'art routiers

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
NF EN 1991-1-3 : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : Actions générales – Charges de neige	1	2004	Norme	Structures	Définition des charges de neige	x		
NF EN 1991-1-4 : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent	1	2005	Norme	Structures	Définition des charges de vent	x		
NF EN 1991-1-5 : Eurocode 1 : actions sur les structures – Parties 1-5 : actions générales – Actions thermiques	1	2004	Norme	Structures	Définition des actions thermiques	x		
NF EN 1997-1, Eurocode 7 : Calcul géotechnique — Partie 1 : Règles générales et son annexe nationale NF P 94-251-2	1	2005	Norme	Structures	Prise en compte des conditions de température, nappe	x		
NF EN 1994-2 : Eurocode 4 – Calcul des structures mixtes acier-béton – Partie 2 : règles générales et règles pour les ponts	1	2006	Norme	Structures	Clause 5.4.2.5 (3) pour le coefficient de dilatation thermique des structures mixtes			
Application des Eurocodes par le Maître d'Ouvrage (publication Sétra)	2	2009	Guide technique	Structures	Neige, vent, température	x		
Fascicule 62, CCTG, « Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil »	3	2014	CCTG	Structures	Prise en compte des conditions climatiques pour la conception et de calcul des fondations d'ouvrages de génie civil	x		
Fascicule 65 : CCTG Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint	3	2014	CCTG	Structures	Prise en compte des conditions climatiques pour la mise en œuvre du béton	x		
Fascicule 67 – titre I : CCTG Étanchéité des ponts routes – Support en béton de ciment	3	2014	CCTG	Structures	Prise en compte des conditions climatiques pour la mise en œuvre de l'étanchéité	x		

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
						Conception	Entretien	Exploitation
Fascicule 68 : CCTG Exécution des travaux de fondation des ouvrages de génie civil	3	2014	CCTG	Structures	Prise en compte des conditions climatiques dans la conception des ouvrages géotechniques (fondations)	x		
Analyse de risque des ouvrages affouillables (publications Sétra)	2	2014	Guide technique	Structures	Influence des précipitations et du risque de crue dans la classification en familles de risque		x	x
Guides techniques ITSEOA : Fascicule 10 : Fondations en site aquatique (publication Sétra)	3	2013	Instruction technique	Structures	Inspection subaquatique (affouillement)		x	x
Note d'information – Calcul du souffle des joints de chaussées (publication Sétra)	2	2013	Note d'information	Structures	Joints de chaussée des ponts-routes : détermination du souffle aux Eurocodes	x		
NF EN 1337 : Appareils d'appui structuraux	2	2004	Norme	Structures	Appareils d'appui structuraux – Partie 10 : Surveillance et entretien / Annexe B (B.2) : détermination de la température de la structure		x	
NF EN 206-1 : Béton – Partie 1 : spécification, performance, production et conformité	2	2012	Norme	Structure	Norme d'exécution des bétons précisant les classes de durabilité selon des cartes de gel et de salage	x		

Tableau 20 : Référentiels d'ouvrages d'art routiers catégorisés. Source : Cerema.

4.5 - Référentiels ferroviaires

La liste de ces référentiels est une première évaluation à dire d'expert, n'a pas de garantie d'exhaustivité, ne préjuge en rien une éventuelle modification de cette liste par le retrait ou l'ajout de référentiels SNCF ou d'autres modifications liées notamment à l'évolution des connaissances scientifiques ou à la mise en œuvre de la réforme ferroviaire française.

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
<p>Arrêté interministériel 17/05/2001 dit « arrêté technique ». L'arrêté interministériel du 17 mai 2001 est illustré dans l'UTE C 11-001 d'août 2001 « Conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie publique. »</p> <p>et Fascicule 62 (titre V) : règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil (CCTG applicable aux marchés publics de travaux)</p>		2	17/05/2001	Arrêté interministériel	Systèmes caténaïres (poteaux caténaïres)	L'arrêté interministériel du 17/05/2001 fixe la résistance à 1200 Pa sur une surface plane et 720 Pa sur une surface cylindrique, soit environ 160 km/h. Le seuil de dimensionnement des supports est fixé selon l'AI du 17 mai 2001 à 1,8 fois la limite élastique du matériau	x		

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
<p>NF EN 50125-1 Mai 2012 – Applications ferroviaires – Conditions d'environnement pour le matériel – Partie 1 : équipement embarqué du matériel roulant</p> <p>NF EN 50125-2 Mai 2003 – Applications ferroviaires – Conditions d'environnement pour le matériel – Partie 2 : installations électriques fixes</p> <p>NF EN 50125-3 Mai 2003 – Applications ferroviaires – Conditions d'environnement pour le matériel – Partie 3 : équipement pour la signalisation et les télécommunications</p>		À vérifier avec le groupe de normalisation adéquat	2003 / 2012	Norme européenne NF		Classification spécifiant, entre autres, la température ambiante extérieure, la température en interne des compartiments du véhicule, ainsi que la température dans les coffres électroniques	x		
<p>Norme NF EN 50123 – Alimentation électrique – installations fixes et appareillages auxiliaires en courant continu</p> <p>NF EN 50163 – Tension d'alimentation des réseaux de traction (alimentation électrique et mise à la terre des équipements de transports publics et appareillage auxiliaire)</p> <p>NF EN 50124 – Coordination de l'isolement dans le domaine ferroviaire ; s'applique aux matériels utilisés en signalisation, matériels roulants et installations fixes jusqu'à 2000m au-dessus du niveau de la mer</p>		À vérifier avec le groupe de normalisation adéquat		Norme européenne NF		<p>Plus spécifiquement :</p> <p>– froid (formation de glace, neige abondante, givre) : appareils de coupure des caténaires (NF 501231-1 – EN 50163 et EN 50124)</p> <p>– vent (tempêtes) : respect des normes au regard des distances d'isolement en fonction du domaine de tension selon la norme EN 50124 pour les isolateurs des systèmes caténaires</p>	x		

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
IN 0283 – Libération des LRS avec tendeurs hydrauliques ou à température naturelle	SNCF	3		IN	Voie	Température (température de libération calculée pour la pose du rail de 25°C, température de résiliation calculée pour la pose du rail de 25°C)	x		
IN 3001 – Principes Généraux applicables à la pose de voie en Longs Rails Soudés (LRS)	SNCF	3		IN	Voie	La température maximale du rail sur le Réseau Ferré National est de 60°C. Ce paramètre permet déterminer le niveau maximal de contrainte dans le rail et de dimensionner les composants et les règles de maintenance associées : rails, attaches, traverses, profil de ballast et qualité	x		
IN 2915 – Conditions d'armement et trace pour la création de LRS	SNCF	3		IN	Voie	Pour s'assurer que la zone située entre les têtes à l'intérieur du souterrain ne sera jamais soumise à des efforts thermiques de compression, les LRS doivent être libérés à une température comprise entre 25°C et 32°C, pour être supérieure à la température ambiante maximum du tunnel pouvant être constatée entre ces points			
IN 3002 – Conditions techniques à respecter pour l'entretien des LRS et des appareils incorporés sur Lignes Classiques et Lignes à Grande Vitesse	SNCF	3		IN	Voie	Définition des conditions techniques à respecter pour l'entretien des longs rails soudés et des appareils de voie incorporés équipant les voies principales des lignes classiques et des lignes à grande vitesse et les voies distantes de moins de 3 m des voies principales (distance mesurée entre les rails les plus proches) et cela, quels que soient les conditions de température rencontrées au moment des travaux effectifs et lors de la période de stabilisation et des mesures à prendre en cas d'incident (ruptures et défauts de rail, déformation de voie, surchauffe accidentelle des rails)			

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
IN 3003 – Conditions techniques applicables aux travaux de création de renouvellement ou de modification de LRS sur lignes classiques et lignes à grande vitesse	SNCF	3		IN	Voie	Définition des conditions techniques à respecter pour gérer le risque de déformation de la voie en situation de travaux de pose, de renouvellement ou de modification des voies en LRS			
IN 3183 – Conditions d'armement et de trace devant être respectées pour les LRS du patrimoine	SNCF	3		IN	Voie	Fourniture aux acteurs de la maintenance les règles permettant : – de vérifier la conformité des LRS existants du patrimoine, quel que soit le référentiel en vigueur au moment de leur création, en fixant les conditions d'armement et de tracé que doit satisfaire tout LRS réalisé, – de définir les zones devant faire l'objet d'une amélioration de la marge de sécurité vis-à-vis de leur stabilité aux températures maximales ou, à défaut, d'une surveillance spécifique en période caniculaire			
IN 0291 – Incorporation des appareils de voie avec tendeurs hydrauliques ou à température naturelle	SNCF	3		IN	Voie	Définition des conditions techniques à respecter pour effectuer une incorporation d'appareil de voie par tendeurs hydrauliques ou à température naturelle, des différentes méthodologies d'incorporation d'appareil de voie, y compris la conduite à tenir en cas d'incident lors de la libération d'un LRS. Il s'applique aux LRS et appareils de voie incorporés posés sur une voie ballastée entre autres			
IN 3590 – Libération des L.R.S par chauffage à l'aide du train « BOA »	SNCF	3		IN	Voie	Description des conditions techniques à respecter pour libérer un LRS à l'aide du train BOA, des différentes méthodologies de libération d'un LRS à l'aide du train BOA, et de la conduite à tenir en cas d'incident lors de la réalisation d'une libération de LRS à l'aide du train BOA			

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
IN 2955 – Remplacement de rails ou de soudures en LRS	SNCF	3		IN	Voie	Définition des modes opératoires à respecter en LRS pour effectuer les opérations de réparation des rails ou soudures rompues ou présentant un défaut entraînant le remplacement d'un tronçon de rail			
IN 0259 – Conception réalisation entretien des structures d'assise et des plates-formes, des ouvrages de drainage et d'écoulement qui les complètent, drainage structure d'assise, plate-forme, collecteur, tunnel, fosse, assise, sous-couche	SNCF	3		IN	Voie	Disposition relative à la conception, réalisation et entretien des ouvrages de drainage et d'écoulement			
IN 0319 – Surveillance et maintenance de la voie	SNCF	3		IN	Voie	Procédure de vérification de la stabilité de la voie ballastée et des mesures à prendre lorsque cette stabilité est ou risque d'être affectée de façon inopinée. Les règles énoncées dans cette procédure sont applicables aux voies équipées de barres normales ou de longs rails soudés. Elles concernent les voies principales des lignes classiques et des lignes à grande vitesse (LGV)			
IN 1252 – Petits ouvrages sous voies et à proximité des voies	SNCF	3		IN	Voie	Guide dans le choix des solutions qui, sur les plans technique et économique, sont les plus appropriées aux projets courants. Ouvrage d'art – Buse métallique – Béton – Ouvrage sous voie – SOLON – Voie			
IN1833 – Maintenance des fossés en terre (qui sera remplacé par IN4488)	SNCF	3		IN	Voie	Modalités de surveillance et de maintenance des fossés en terre sur l'ensemble des lignes du réseau ferré national			

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
IN 3930 – Politique d'entretien courant de l'infrastructure	SNCF	3		IN	Voie	Présentation des concepts de maintenance s'appuyant sur les références normatives, indiquant par ailleurs les particularités de la maintenance des différentes techniques ferroviaires ainsi que les principaux textes qui s'appliquent			
IN 4487 – Surveillance des ouvrages en terre et des dispositifs associés (complément à IN0256).	SNCF	3		IN	Voie	Détail des opérations à réaliser pour exercer au mieux la surveillance des ouvrages en terre sensibles et particuliers du patrimoine ferroviaire			
IN 0312 – Tournée de surveillance sur les lignes classiques à Vitesse inférieure ou égale à 220 km/h	SNCF	3		IN	Installations du RFN	Établissement des seuils de surveillance des installations du réseau ferré national, intégrant la vétusté des équipements ou la maintenance et l'entretien courant : mesure de température des rails, anémomètre, débroussaillage, entretien des fossés, usure du fil de contact... Exemples : – les tournées chaleur sont organisées conformément à ce référentiel dès que la température du rail peut dépasser 45°C ; – des tournées saison froides sont menées conformément au référentiel IN0312. Les coupons défectueux sont remplacés lorsque la température est inférieure à 5°C. – inondation (voie courante en déblais équipées en caténaires) : tournées de surveillance périodique, tournées intempéries		x	
IN 0256 – Surveillance des ouvrages en terre, des drainages et des plates-formes	SNCF	3		IN	Voie	Inondations : tournées de surveillance des ouvrages en terre		x	x

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
IN 0284 – Principes de maintenance des rails	SNCF	3		IN	Voie	Température : froid : tournées de surveillance et de gestion des défauts de rail		x	x
IN 0631 – Choix du système et du dispositif de réchauffage à appliquer sur les aiguillages	SNCF	3		IN	Voie	Choix du système et du dispositif de réchauffage à appliquer sur les aiguillages			
IN 3297 – Tournées de surveillance sur les LGV	SNCF	3		IN	Voie	<p>La période de surveillance particulière à la saison chaude est celle durant laquelle les températures sont susceptibles d'atteindre et dépasser fréquemment 45°C au rail.</p> <p>La tournée de forte chaleur en train est à réaliser dès le troisième jour où la température maxi de l'air ambiant est susceptible d'atteindre 34°C, à la suite des troncs communs temporaires, pour les domaines concernés. Elle cessera dès que la température maxi de l'air sera redescendue au-dessous de 34°C pendant au moins deux jours consécutifs.</p> <p>Certaines circonstances atmosphériques exceptionnelles sont susceptibles de créer un danger pour la circulation des trains, ou de troubler le bon fonctionnement des installations (signaux, caténaires...), comme notamment : les pluies torrentielles, vents violents, inondations, chutes abondantes de neige, formation de verglas, fortes gelées, etc.</p>		x	x
IN 0315 – Surveillance technique de la voie. Mesures à prendre en vue d'assurer le fonctionnement des installations de signalisation pendant les périodes de grand froid.	SNCF	3		IN	Signalisation	Mesures préventives et à appliquer pendant les périodes de grand froid ou de chute de neige, pour assurer le bon fonctionnement des installations de signalisation		x	x
IN 2913 – Règles de maintenance – tringlerie des aiguillages	SNCF	3		IN	Signalisation	Concerne la sécurité de l'exploitation ferroviaire		x	x

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
IN 0393 – Systèmes informatiques de signalisation. Règles générales de maintenance	SNCF	3		IN	Signalisation	Il s'agit de surveiller les systèmes en charge de la régulation de la température du local technique dans lequel se trouve un système informatique. Tous les systèmes informatiques sont conçus pour fonctionner dans un air ambiant (celui du local technique) dont la température est de l'ordre de +18 à +27 °C (bâtiment climatisé)	x	x	x
IN 1817 – Politique de maintenance des installations de traction électrique des lignes classiques : – à courant continu 1500V – à courant alternatif 25000V – 50Hz	SNCF	3		IN	Caténaires	<p>Localement, il y a lieu de tenir à jour un cahier des particularités comprenant :</p> <ul style="list-style-type: none"> – état des zones ou installations ayant une périodicité adaptée pour des raisons techniques de tenue des ITE aux sollicitations (ne concerne pas les adaptations liées au SPRC) ; – état des équipements dits « sensibles » en périodes chaudes ; – état des zones critiques vis-à-vis du dimensionnement électrique ou du retour traction ; – état des zones critiques vis-à-vis de la tenue des composants des ITE (concerne les composants pour lesquels une adaptation de la surveillance ou de l'entretien ne garantit pas pour autant la tenue mécanique ou électrique). <p>Certains états peuvent être sans objet, dans ce cas ils seront annotés de l'indication « non concerné »</p>			

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
IN 2447 – IFTE – Conduite – Exploitation Dégivrage de la caténaire – définit les dispositions générales applicables en cas de prévisions et d'alertes météorologiques « givre »	SNCF	3		IN	Caténaires	Ce document permet d'identifier les différents acteurs du processus de dégivrage de la caténaire et de hiérarchiser les niveaux d'intervention. Il présente également les différentes méthodes de lutte contre le givre et évalue leur efficacité en fonction du contexte		x	
Principe SNCF 305090	SNCF	3			Systèmes caténaires (massifs)	Inondation (risque de glissement des terres). La forme de la fouille est réalisé en fonction du terrain selon le principe 305090		x	
IN 3278 – Référentiel technique pour la réalisation des LGV – Partie génie civil (tomes 2 et 3)	SNCF	3		IN	Génie civil	Conception et réalisation des ouvrages : – de génie civil d'une ligne à grande vitesse (V supérieure ou égale à 230 km/h) dédiée aux circulations « voyageurs » ou recevant un trafic mixte (circulations voyageurs + fret) – des voies de raccordement de la LGV au réseau ferré existant et des ouvrages annexes (rétablissements routiers...) concomitants à l'établissement de l'infrastructure ferroviaire. Les règles de dimensionnement relatives aux ouvrages en terre, aux ouvrages hydrauliques et aux ouvrages d'art sont définies. Les exigences d'accessibilité à ces ouvrages – et à la superstructure – pour leur maintenance et pour la sécurité de la ligne sont explicitées			

Tableau 21 : Référentiels ferroviaires catégorisés. Source : RFF, SNCF.

Les tableaux ci-dessous résument les textes susceptibles d'être impactés par le changement climatique. Dans ces tableaux, on se place dans l'hypothèse de techniques actuelles, seul le climat change, on ne tient donc pas compte des éventuelles évolutions technologiques.

4.6 - Référentiels maritimes et fluviaux

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
ROSA 2000 (recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en sites aquatiques)	CETMEF	1	2000	Recommandations	Infrastructures portuaires et fluviales	Niveaux d'eau : tableau introduisant le niveau d'eau à prendre en compte (avec période de retour associée) pour dimensionner un ouvrage + cartes des niveaux extrêmes Question : quel niveau d'eau prendre pour dimensionner un ouvrage : niveau actuel ou niveau dans 100 ans ? Quelle valeur de la remontée de la mer ?	x		
ROSA 2000 (recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en sites aquatiques)	CETMEF	1	2000	Recommandations	Infrastructures portuaires et fluviales	Courant (pas de valeurs de définies mais formules pour appliquer l'action aux ouvrages)	x		
ROSA 2000 (recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en sites aquatiques)	CETMEF	1	2000	Recommandations	Infrastructures portuaires et fluviales	Glace : référence à la normalisation allemande : épaisseur de glace sur ouvrages fluviaux	x		
NF EN 1991-1-3 actions générales – charges de neige	AFNOR	2	2004	Norme européenne	Infrastructures portuaires et fluviales	Carte de neige à actualiser ?	x		
ROSA 2000 (recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en sites aquatiques)	CETMEF	1	2000	Recommandations	Infrastructures portuaires et fluviales	Houle (pas de valeurs de définies, on fait appel à des périodes de retour ou des valeurs statistiques)	x		
ROSA 2000 (recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en sites aquatiques)	CETMEF	1	2000	Recommandations	Infrastructures portuaires et fluviales	Débits : débits de crue, débit d'étiage	x		
ROSA 2000 (recommandations pour le calcul aux états limites des ouvrages en sites aquatiques)	CETMEF	1	2000	Recommandations	Infrastructures portuaires et fluviales	Vent : on renvoie aux cartes de vent des Eurocodes. Des valeurs seuils sont définies pour l'utilisation des outillages et équipement ou encore à la tenue à quai des navires, mais cela relève la plupart du temps d'un seuil défini par le constructeur et traduit dans les règles d'exploitation	x		
NF EN 1991-1-4 actions générales – action du vent	AFNOR	2	2005	Norme européenne	Infrastructures portuaires et fluviales	Carte de vent à actualiser ? Faut-il envisager de prendre en compte des vents dans 100 ans si dimensionnant ?	x		
NF EN 1991-1-5 actions générales – actions thermiques	AFNOR	2	2004	Norme européenne	Infrastructures portuaires et fluviales	Carte de température à actualiser ?	x		

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual.	CIRIA OUR CETMEF	1	2009	Recommandations	Infrastructures fluviales	Bonne connaissance des houles nécessaire...mais plus basée sur des valeurs statistiques connues que sur des prospections. La détermination du niveau d'eau est également essentielle : comment intégrer l'élévation du niveau de la mer dans le dimensionnement ?	x	x	
NF P 94-261 Calcul géotechnique – Ouvrages de fondations – Fondations superficielles	AFNOR	1	Pas encore publiée	Norme d'application nationale	Infrastructures portuaires et fluviales	Niveau d'eau : quel niveau d'eau pour calculer les surépaisseurs d'acier (durabilité des ouvrages) + quel niveau d'eau pour dimensionner l'ouvrage ? Faut-il prendre en compte la surélévation du niveau de la mer dans le dimensionnement ? Si oui, comment ?	x		
Recommandations sur les barrages réservoirs d'alimentation des canaux à bief de partage expertise surveillance et entretien confortement et annexes	CETMEF VN 92-02	1	1992	Recommandations	Infrastructures fluviales	Débit moyen décennal – débit moyen de crue extrême – débit de pointe de crue		x	
NF P 94-282 Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Écrans de soutènement et ancrages	AFNOR	1	2010	Norme d'application nationale	Infrastructures portuaires et fluviales	Niveau d'eau : quel niveau d'eau pour calculer les surépaisseurs d'acier (durabilité des ouvrages) + quel niveau d'eau pour dimensionner l'ouvrage ? Faut-il et comment est pris en compte la surélévation du niveau de la mer dans le dimensionnement ?	x		
Conception et dimensionnement des digues à talus PM 97.01	CETMEF PM 97-01	1	1997	Guide méthodologique	Infrastructures portuaires : défenses	Bonne connaissance des houles nécessaire : H1/10 décennale (début de dommage carapace) – H1/10 centennal (ruine carapace) – H1/3 annuel (pour l'agitation) – Hmax centennal et Hmax décennal (couronnement) ... mais plus basé sur des valeurs statistiques connues que sur des prospections. La détermination du niveau d'eau est également essentielle (marée astronomique + surcote) – comment intégrer l'élévation du niveau de la mer dans le dimensionnement ?	x		
Recommandations générales sur la conception des ouvrages maritimes	CETMEF – ER PM 93.02	1	1993	Guide méthodologique	Infrastructures portuaires : digues et jetées	Agitation, vent, houle : pas de valeurs utilisées mais valeurs à définir en amont en particulier pour les houles (faut-il anticiper des modifications de régime de houle dans la détermination des houles de projet ?)	x		
NF EN 1993-5 pieux et palplanches	AFNOR	1	2007	Norme européenne	Infrastructures portuaires et fluviales	Niveau d'eau : quel niveau d'eau pour calculer les surépaisseurs d'acier (durabilité des ouvrages)?			
Les Chenaux d'accès – rapport du groupe de travail conjoint AIPCN-AIPH II-30 – Guide de conception	PIANC AIPCN	1	1999	Guide méthodologique	Infrastructures maritimes	Sont utilisés les courants (longitudinal et traversier dominant), les houles (hauteur de houle significative et longueur d'onde) et les vents (traversiers dominants), mais par l'intermédiaire de valeur seuils pour déterminer les dimensions d'un chenal	x		x
Les études préalables aux aménagements portuaires	CETMEF PM 78.04	1	1978	Guide méthodologique	Infrastructures portuaires	Sont mentionnées houles marées courant, mais sans définition de valeur à appliquer	x		

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
ISO/DIS 21650 – Actions from waves and currents on coastal structures	AFNOR	1	2007	Norme internationale	Infrastructures côtières		x		
Efforts hydrodynamiques sur les pieux	CETMEF PM 86-03	1	1986	Guide méthodologique	infrastructures portuaires et fluviales : ouvrages sur pieux	Houle et courant : pas de valeurs fixées mais formules pour application sur les structures	x		
Action de la houle sur les fonds marins	CETMEF PM 86.02	1	1986	Guide méthodologique	infrastructures portuaires	Houle : pas de valeurs fixées mais formules pour application sur les structures	x		
Théories de la houle. Houle réelle. Propagation de la houle	CETMEF PM 85.01	1	1985	Guide méthodologique	infrastructures portuaires	Houle : pas de valeurs fixées mais formules pour application sur les structures	x		
Critères régissant les mouvements des navires amarrés dans les ports – guide pratique	PIANC AIPCN	1	1995	Recommandations	infrastructures portuaires	Houle, vent et courant : pas de valeurs fixées mais formules pour application sur les structures	x		
Défenses de berges en enrochements	CETMEF VN 96-02	1	1996	Guide méthodologique	infrastructure fluviale	Houle (amplitude)			
Recommandations pour le dimensionnement et la construction de revêtements souples incorporant des géotextiles pour les voies navigables intérieures	PIANC AIPCN	1	1987	Documentation technique	infrastructure fluviale	Détermination du niveau d'eau : quel niveau d'eau ? Quelle vague associée ?	x		
Breakwaters with vertical and inclined concrete walls Marcom GT 28	PIANC AIPCN	1	2003	Documentation technique	Infrastructures portuaires : défenses	Bonne connaissance des houles nécessaire... mais plus basé sur des valeurs statistiques connues que sur des prospections. La détermination du niveau d'eau est également essentielle (marée astronomique et surcote). Comment intégrer l'élévation du niveau de la mer dans le dimensionnement ?	x		
Dimensionnement et construction de revêtements souples incorporant des géotextiles en milieu marin – recommandations – Marcom GT 21	PIANC AIPCN	1	1996	Documentation technique	Infrastructures portuaires : défenses	Bonne connaissance des houles nécessaire : H1/10 décennale (début de dommage carapace) – H1/10 centennal (ruine carapace) – H1/3 annuel (pour l'agitation) – Hmax centennal et Hmax décennal (couronnement)... mais plus basé sur des valeurs statistiques connues que sur des prospections. La détermination du niveau d'eau est également essentielle (marée astronomique et surcote) – comment intégrer l'élévation du niveau de la mer dans le dimensionnement ?	x		

Titre du document	Auteur / Éditeur	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
Analyse des digues à talus en enrochements Marcom GT 12	PIANC AIPCN	1	1996	Documentation technique	Infrastructures portuaires : défenses	Bonne connaissance des houles nécessaire : H1/10 décennale (début de dommage carapace) – H1/10 centennial (ruine carapace) – H1/3 annuel (pour l'agitation) – Hmax centennial et Hmax décennial (couronnement) ... mais plus basé sur des valeurs statistiques connues que sur des prospections. La détermination du niveau d'eau est également essentielle (marée astronomique et surcote). Comment intégrer l'élévation du niveau de la mer dans le dimensionnement ?	x		
Innovation in navigation lock design	PIANC AIPCN	1	2009	Documentation technique	Infrastructure fluviale	Notions de vagues et de courant évoquées	x		
Protection contre la corrosion des structures métalliques en site aquatique (2 volumes, dont le deuxième est en cours de révision)	CETMEF QG 88-02	1	1988	Guide méthodologique	Infrastructure fluviale	Salinité – température de l'eau – niveau d'eau sont des facteurs qui influencent la corrosion des structures métalliques. Comment prendre en compte les évolutions de ces valeurs lors du dimensionnement ?	x	x	
Circulaire 76-38 modifiée 95-86	Ministère équipement	1	1995	Circulaire ministérielle	Infrastructure fluviale	Niveau PHEN	x		x
Instruction technique, surveillance, entretien et réparation des barrages mobiles en rivière	CETMEF VN 96-01	1	1996	Documentation technique	Infrastructures portuaires : défenses	Débits fluviaux	x	x	x
L'aménagement des voies navigables par canalisation des rivières	CETMEF VN 78-01	1	1978	Documentation technique	Infrastructure fluviale	Débits fluviaux : moyens journaliers, mensuels, annuels pour dimensionner des charges critiques de barrage, fonctionnement... – crue : décennale, centennale... – niveau de nappe phréatique – niveau des PHEN	x		
Les barrages mobiles de navigation : guide du chef de projet	VNF – CETMEF	1	1988	Guide méthodologique	Infrastructure fluviale	Connaissance des débits pour l'exploitation et la gestion – connaissance des crues (utilisation de méthodes déterministes et/ou probabilistes). Connaissance des niveaux d'eau : plus hautes eaux navigables ... Comment et faut-il intégrer une éventuelle augmentation des valeurs dans le dimensionnement ?	x		x

Tableau 22 : Référentiels maritimes, fluviaux et portuaires catégorisés. Source : Cerema, VNF.

4.7 - Référentiels aéroportuaires

Titre du doc.	Source	Catégorie	Date de publication / version	Type de doc.	Infra.	Variable climatique	Thème		
							Conception	Entretien	Exploitation
Chapitre 2 (Paragraphe 2.4) de l'annexe 14 Volume I : « Conception et exploitation technique des aérodromes ». Sujet : Température de référence	OACI	1	19/11/2009	Recommandation internationale	Aéroports	Température	x		x
Chapitre 2 (Paragraphe 2.9) de l'annexe 14 Volume I : « Conception et exploitation technique des aérodromes ». Sujet : Présence d'eau sur la piste	OACI	1	19/11/2009	Recommandation internationale	Aéroports	Précipitations, y compris neige	x		x
Chapitre 3 (Paragraphe 3.1) de l'annexe 14 Volume I : « Conception et exploitation technique des aérodromes ». Sujet : Longueur des pistes	OACI	1	19/11/2009	Recommandation internationale	Aéroports	Vent, température, humidité, précipitations	x		x
Chapitre 3 (Paragraphe 3.1) de l'annexe 14 Volume I : « Conception et exploitation technique des aérodromes ». Sujet : Recommandations relatives aux vents de travers	OACI	1	19/11/2009	Recommandation internationale	Aéroports	Vent			x
Le manuel de conception des aérodromes – Doc -9157-1 – Sujet : Influence du vent – conception et exploitation des aérodromes	OACI	1	2006	Recommandation Internationale	Aéroports	Température, vent			x
Doc 9157 part 2. Sujet : Recommandations relatives aux vents et aux bâtiments	OACI	1	2005	Recommandation internationale	Aéroports (bâtiments)	Vent	x		
Normes de produits utilisés pour la construction des chaussées (NF EN 12271 / NF EN 12591 / NF EN 13043 / NF EN 13108 -1 / NF EN 13108 -2 / NF EN 13108 -4 / NF EN 13108 -5 / NF EN 13108 -8 / NF EN 13108 -20 / NF EN 13108 -21 / NF EN 13924 / NF EN 14023 / XP P 18545 / NF P 98 150-1 (cette liste peut évoluer). Sujet : Produits utilisables pour la construction et la rénovation des chaussées aéronautiques	AFNOR	2	-	Normes	Aéroports	Type de climat	x	x	
Guide : « enrobés hydrocarbonés et enduits superficiels pour chaussées aéronautiques, guide d'application des normes »	DGAC – STAC	3	2009	Guide technique	Aéroports	Type de climat	x		
Annexe nationale pour la définition des zones pour la conception des bâtiments (résistance aux vents, neige...). Sujet : action sur les structures	Eurocode 1	3	-	Norme (Annexe)	Aéroports (bâtiment)	Vent, neige...	x		

Tableau 23 : Référentiels aéroportuaires catégorisés. Source : STAC.

Les tableaux ci-dessous résument les textes susceptibles d'être impactés par le changement climatique. On se place dans ces tableaux dans l'hypothèse de techniques actuelles, seul le climat change, on ne tient donc pas compte des éventuelles évolutions technologiques.

4.8 - Référentiels spécifiques aux remontées mécaniques et transports guidés

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Référence	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
Référentiel technique relatif à la sécurité de l'exploitation des chemins de fer touristiques (RTCFT)	1	29/08/2011	Guide technique	RTCFT	CFT/CD	Inondation, foudre, glissement de terrain, éboulement			x
Réglementation technique des téléphériques : Guide RM 1 v2 / « exploitation et la maintenance des téléphériques »	1	11/06/2010	Guide technique	RM1 v2	RM	Gel, foudre, neige, givre		x	x
Réglementation technique des téléphériques : Guide RM 2 v1 / « conception générale et modification des téléphériques »	1	20/04/2010	Guide technique	RM2 v1	RM	Température, vent, givre	x		
Réglementation technique des téléskis : Arrêté 09/08/2011 relatif à la conception, à la réalisation, à la modification, à l'exploitation et à la maintenance	1	09/08/2011	Réglementation technique	-	RM	Givre	x	x	x
Réglementation technique des téléskis : RM 3 / Guide STRMTG « Exploitation, maintenance et modifications des téléskis » + Annexe 1 du guide RM 3 : Guide inspection à 30 ans des téléskis	1	10/02/2012	Guide technique	RM3	RM	Vent, givre, neige		x	x
Guide technique du STRMTG : RM5 – Exploitation des funiculaires	1	11/03/2008	Guide technique	RM5	RM	Vent, givre, neige, foudre			x
Réglementation technique des téléskis : RM 4 / Guide STRMTG « Conception générale et modification substantielle des téléskis »	1	10/02/2012	Guide technique	RM4	RM	Vent, givre	x		
Application ferroviaire / condition d'environnement pour le matériel / équipement embarqué	2	01/07/1999	Norme européenne	NF EN 50125-1	TG	Température, pluie, neige, foudre	x	x	x
Application ferroviaire / condition d'environnement pour le matériel / installations électriques fixes	2	01/05/03	Norme européenne	NF EN 50125-2	TG	Température, pluie, neige, foudre	x	x	x
Application ferroviaire / condition d'environnement pour le matériel / équipement pour la signalisation et les télécommunications	2	01/05/03	Norme européenne	NF EN 50125-3	TG	Température, pluie, neige, foudre	x	x	x
Application ferroviaire / Voie – Appareils de voie	1	Mars 2004 / janvier 2006 / déc. 2005 / juin 2006	Norme européenne	NF EN 13232 (1 à 9)	TG	Température	x		

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Référence	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
Application ferroviaire – Équipements électroniques utilisés sur le matériel roulant	2	01/12/2001	Norme européenne	NF EN 50155	TG	Température	x	x	x
Application ferroviaire / Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité (FDMS)	1	01/02/1999	Norme européenne	NF EN 50126	TG	Température, neige, inondation, pluie, glissement de terrains	x		
Applications ferroviaires – Résistance des structures de véhicules ferroviaires	1	01/07/2001	Norme européenne	NF EN 12663	TG	Vent, température	x		
Arrêté du 9 août 2011 relatif à la conception, à la réalisation, à la modification, à l'exploitation et à la maintenance des téléskis	1	09/08/2011	Réglementation technique	-	RM	Givre, tempête, foudre	x	x	x
Arrêté du 7 août 2009 relatif à la conception, à la réalisation, à la modification, à l'exploitation et à la maintenance des téléphériques	1	07/08/2009	Réglementation technique	-	RM	Givre, tempête, foudre	x	x	x
Sécurité des tapis roulants pour les activités de sports d'hiver ou de loisirs	1	01/12/2011	Norme française	NF EN 15700	RM	Température	x	x	
Arrêté du 17 mai 2001 fixant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique	1	17/05/2001	Réglementation technique	-	Commun	Neige, vent, givre, pluie	x		
Règlement neige et vent	1	01/05/2009	Réglementation technique	NV65	Commun	Neige, vent	x		
Entraînements et autres dispositifs mécaniques	1	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 13223	RM	Vent, température, givre, pluie	x		x
Dispositifs électriques autres que les entraînements	1	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 13243	RM	Température, foudre	x		x
Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes Dispositions générales – Partie 1 : Prescriptions applicables à toutes les installations	2	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 12929-1	RM	Vent, température, foudre	x		
Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Dispositifs de mise en tension	1	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 1908	RM	Température	x	x	
Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes / véhicules – Partie 1 : Attaches, chariots, freins embarqués, cabines, sièges, voitures, véhicules de maintenance, agrès	2	01/09/2005	Norme européenne	NF EN 13796-1	RM	Vent	x		
Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Ouvrages de génie civil	2	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 13107	RM	Vent, neige, givre	x		
Prescriptions de sécurité des installations à câbles transportant des personnes – Calculs	2	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 12930	RM	Vent, givre	x		
Prescription de sécurité des installations à câbles transportant des personnes – Dispositions générales – Partie 2 : Prescriptions complémentaires pour les téléphériques bicâbles à va-et-vient sans frein de chariot	1	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 12929-2	RM	Vent	x		x

Titre du document	Catégorie	Date de publication	Type de doc.	Référence	Infra.	Variable climatique	Thèmes		
							Conception	Entretien	Exploitation
Prescription de sécurité des installations à câbles transportant des personnes – Exploitation	1	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 12397	RM	Vent			x
Prescriptions de sécurité pour les installations à câbles transportant des personnes – Examen probatoire, maintenance, contrôles en exploitation	1	01/12/2004	Norme européenne	NF EN 1709	RM	Gel, foudre		x	x
Essieux montés et bogies / roue monobloc – procédure d'homologation technique	1	01/12/2007	Norme européenne	NF EN 13979-2	TG	Température, vent	x		

Tableau 24 : Référentiels spécifiques aux remontées mécaniques et transports guidés catégorisés. Source : STRMTG.

Résumé

Les impacts du climat sur les infrastructures de transport sont susceptibles d'augmenter au cours du siècle à venir. Le présent rapport répond à l'action 1 du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, qui a pour objectif de permettre l'adaptation de ces infrastructures au changement climatique.

Différents rapports internationaux et nationaux font état d'évolutions climatiques projetées : augmentation des températures moyennes, évolution des régimes de précipitations, des régimes de vent, des événements extrêmes, augmentation du niveau de la mer, etc. (GIEC, 2007, 2013 ; Peings, 2011, 2012 ; Planton, 2012).

Après avoir rappelé les principales évolutions climatiques projetées à l'horizon 2100, ce rapport présente les impacts actuels du climat, ainsi que les impacts potentiels des évolutions climatiques attendues sur : les infrastructures routières (y compris ouvrages de transports urbains), les ouvrages en terre, les ouvrages d'art, les infrastructures ferrées, fluviales, maritimes et portuaires, aéronautiques et enfin, les systèmes de transports et remontées mécaniques.

Pour chacun de ces domaines d'infrastructures, les référentiels techniques de conception, d'entretien et d'exploitation dans lesquels interviennent des variables climatiques ont été listés et classés en trois catégories de priorité d'adaptation. Enfin, une liste des projections climatiques nécessaires à l'adaptation de ces référentiels a été établie.

Cette adaptation ultérieure devrait permettre une meilleure prise en compte des évolutions climatiques à venir.