

INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN FRANCE : VULNERABILITE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET POSSIBILITES D'ADAPTATION

Ian Cochran*

Les impacts du changement climatique, répandus dans le monde entier, varient d'un endroit à un autre à l'échelle locale ; des mesures d'adaptation au niveau local et/ou régional sont donc indispensables. Le présent rapport identifie les risques que représente le changement climatique pour les infrastructures de transport en France, les acteurs concernés et les mesures d'adaptation potentielles. Il s'attache à la fois au transport terrestre (route et rail), au domaine aérien et à la navigation intérieure. L'évaluation de la vulnérabilité aux changements climatiques saisonniers et extrêmes est ici fondée sur deux scénarios climatiques mondiaux élaborés par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, scénarios A2 et B2) et déclinés par Météo France et l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) pour le territoire français. Ceux-ci prévoient une évolution potentielle des températures et des précipitations dans l'Hexagone. L'analyse graphique des impacts potentiels sur le territoire français permet de localiser et d'évaluer l'étendue de ces impacts.

Outre une analyse et une description des impacts physiques et opérationnels pour chaque mode de transport, ce rapport présente les risques potentiels qui pèsent sur un certain nombre d'infrastructures et précise la nécessité d'une analyse plus poussée concernant la vétusté des infrastructures, les normes de construction et le contexte géographique. L'évolution des moyennes climatiques (températures et précipitations) pourrait également entraîner des changements dans la demande d'infrastructures de transport, dus notamment à une modification des flux touristiques et de la production agricole. Les mesures d'adaptation se concentrent principalement sur l'évolution des procédures et des critères techniques d'aménagement du territoire en vue de mieux adapter les nouvelles infrastructures au changement climatique, ainsi que sur la réhabilitation et, dans certains cas, la protection des infrastructures existantes. De la même façon, il peut s'avérer nécessaire de repenser le mode d'attribution des concessions et des contrats de services pour le transport et la maintenance des infrastructures afin d'encourager des mesures d'adaptation. La réussite de ces efforts dépendra de la capacité d'un grand nombre d'acteurs impliqués dans la planification, la construction, la maintenance et l'exploitation des infrastructures de transport à développer et à mettre en œuvre des approches cohérentes.

* Doctorant du CERNA, Mines ParisTech et Mission Climat de la Caisse des Dépôts
ian.cochran@caissedesdepots.fr – 01 58 50 85 17

L'auteur tient à remercier l'ADEME pour son soutien financier.

REMERCIEMENTS

L'auteur souhaite remercier tous ceux qui l'ont aidé dans la rédaction de ce rapport, en particulier Maria Mansanet-Bataller (Mission Climat – CDC Climat) et Bertrand Reyssset (chargé de mission adaptation au changement climatique au sein de la direction générale de l'énergie et du climat du ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer).

L'auteur assume l'entière responsabilité de toute erreur ou omission.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
I. LES RESEAUX DE TRANSPORT FRANÇAIS	6
A. Transport terrestre	7
B. Transport par voie d'eau	8
C. Transport aérien	9
II. VULNERABILITE DU SYSTEME DE TRANSPORT FRANÇAIS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	9
A. Une vulnérabilité accrue aux conditions climatiques moyennes et extrêmes	11
B. Vulnérabilité à l'évolution des phénomènes extrêmes de vent	19
C. Implications en termes d'exploitation et d'utilisation des infrastructures de transport	19
D. Implications en termes de demande d'infrastructures de transport	20
III. ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	21
A. Mesures d'adaptation	21
B. Importance des acteurs et limites de l'action de cohésion	23
C. Impacts des stratégies de concession et d'investissement privé	25
CONCLUSIONS	26
ANNEXE 1 : BILAN DE LA LITTERATURE INTERNATIONALE	28
ANNEXE 2 : TABLEAU DES IMPACTS PHYSIQUES ET OPERATIONNELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT	30
BIBLIOGRAPHIE	32
LA RECHERCHE DE LA MISSION CLIMAT	35

INTRODUCTION

Comme le précise le quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2007), les niveaux actuels et prévisibles des émissions de gaz à effet de serre auront des conséquences inévitables sur le climat à court et moyen terme. En tant que telle, la réduction globale des émissions de gaz à effet de serre est nécessaire pour limiter de nouveaux changements et développer des mesures d'adaptation permettant de réduire les impacts négatifs et, lorsque c'est possible, tirer parti des effets positifs. Si une attention particulière a été accordée à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, notamment dans le domaine des transports, peu d'études ont été consacrées jusqu'ici aux conséquences du changement climatique (hausse des températures, niveaux de précipitations et évolution des phénomènes climatiques extrêmes) sur les infrastructures de transport qui permettent de répondre aux besoins actuels de mobilité.

L'objet du présent rapport est de combler une lacune perceptible dans la littérature spécialisée en analysant les risques¹ que pose le changement climatique pour les infrastructures de transport de voyageurs et de marchandises en France.² Du fait des difficultés de la modélisation du changement climatique et du manque actuel de scénarios détaillés à haute résolution, ce rapport s'attache à relever les sources d'inquiétudes et à mettre en avant les principaux sujets sur lesquels il conviendra de mener de nouvelles recherches.

Les impacts du changement climatique varient en fonction de la localisation. La compréhension de ces impacts sur une infrastructure donnée passe donc par l'analyse d'un large éventail de facteurs tels que la situation géographique, l'élévation topographique, ou encore la vétusté, l'utilisation et les caractéristiques de construction des infrastructures étudiées. Pour des raisons de contraintes en matière de données et d'informations, l'analyse détaillée de certaines infrastructures dépasse le cadre du présent rapport. Il est néanmoins possible de tirer des règles générales sur les impacts potentiels du changement climatique, en termes de moyennes et extrêmes climatiques, par une identification des dangers, de la vulnérabilité des infrastructures et des capacités d'adaptation en France.

Le changement climatique se traduira par des conséquences physiques sur les infrastructures en tant que telles et influencera leur mode d'utilisation, d'exploitation et de gestion. Étant donnée la multiplicité, tout particulièrement dans le domaine des transports, des institutions, entreprises et acteurs engagés dans la construction, la maintenance et l'exploitation des infrastructures, sans même parler du nombre considérable d'utilisateurs et de bénéficiaires de ces services, il est capital de comprendre à quoi et comment ces différentes parties prenantes devront s'adapter du fait du changement climatique.

Les infrastructures de transport de passagers et de marchandises (routes, voies ferrées, aéroports, tunnels, ponts, ports et canaux) sont vitales pour le développement économique et social du pays. Construits grâce à d'importants investissements publics et privés, les réseaux de transport sont décisifs non seulement pour stimuler le commerce et la fourniture de marchandises, mais aussi pour garantir un accès aux besoins et services de base (travail, santé, éducation, etc.). Par ailleurs, du fait de la forte intensité en capital et de la durée de vie relativement longue de ces installations, les décisions qui façonnent aujourd'hui le développement des infrastructures auront des répercussions sur les 30, 50, voire les 100 prochaines années. Le Tableau 1 présente la durée de vie moyenne estimée des différents modes de transports aux États-Unis, qui est comparable aux infrastructures en France. Les infrastructures de transport représentent généralement des investissements à très long terme (plus de 100 ans).

¹ Si l'évolution des tendances climatiques est susceptible d'induire certains avantages sociaux et économiques (saisons de croissance plus longues, etc.), l'auteur se concentre ici sur les risques négatifs potentiels, pour lesquels une action proactive s'imposera le moment venu.

² Le présent rapport n'aborde pas les systèmes de transports d'énergie et de communication.

Tableau 1 – Durée de vie estimée des infrastructures de transport aux États-Unis

Mode	Infrastructure	Durée de vie
Transport terrestre	Routes	10-20 ans
	Ponts	50-100 ans
	Aqueducs	30-45 ans
	Tunnels	50-100 ans
	Voies ferrées	50 ans
Transport aérien	Pistes	10 ans
	Terminaux	40-50 ans
Transport maritime	Docks et terminaux portuaires	40-50 ans
	Pipelines	100 ans

Source : Kahrl et al. (2008).

Par ailleurs, l'emplacement des routes, voies ferrées, aéroports et voies d'eau influence largement le rythme de développement régional et urbain. Toute interruption ou modification de services entraîne une perturbation du flux normal de circulation qui s'avère extrêmement lourde en termes de coûts directs et indirects. Une fois mis en place, les différents composants (rails, plateformes routières, etc.) sont difficiles à modifier ou à réhabiliter et peuvent devenir des éléments critiques pour l'exploitation efficace de l'ensemble du réseau.

Au vu du rôle clé des infrastructures de transport pour la société et de l'échelle de temps sur laquelle s'échelonnent les choix dans ce domaine, le bon fonctionnement de ces infrastructures implique de répondre à trois questions fondamentales : (i) quelle sera l'influence du changement climatique sur la viabilité des infrastructures à court et long terme ; (ii) quelles sont les mesures à prendre aujourd'hui pour répondre plus efficacement aux conditions de demain, en termes d'opérations et de choix d'investissements ?; et (iii) comment le changement climatique influencera-t-il les tendances et les flux de mobilité à long terme ?

Alors que plusieurs études ont été réalisées en Amérique du Nord et en Océanie, seuls quelques rares pays européens ont procédé à l'évaluation de leurs infrastructures de transport nationales et régionales et aucune étude d'envergure n'a été réalisée en France sur le sujet (cf. Annexe 1 pour un examen détaillé de la littérature relative à ces thématiques). Le présent rapport, dont l'objectif est de répondre à ce manque patent d'analyses au sujet des impacts du changement climatique sur les infrastructures de transport en France, s'organise de la façon suivante. Le chapitre 1 dresse un tableau de la situation des réseaux d'infrastructures de transport en France en vue de mieux comprendre leur vulnérabilité à partir de la configuration des acteurs et de l'étendue de chaque secteur. Il inclut une analyse du transport terrestre (rail et route), aérien et par voie d'eau (ports et canaux). Le chapitre 2 aborde la vulnérabilité de ces réseaux au changement climatique en utilisant une méthode de mappage développée par Mansanet *et al.* (2008). Les impacts potentiels du changement climatique devant être étudiés à une échelle régionale³, cette étude a eu recours aux résultats des deux modèles climatiques régionaux français. Les modèles du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo France et de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)⁴ représentent des dérivés à l'échelle du territoire français⁵ des deux scénarios d'émissions du GIEC couramment utilisés, A2 et B2. Le chapitre 3 abordera brièvement les mesures d'adaptation potentielles en accordant une attention particulière aux acteurs concernés. Le rapport se conclut par un bilan des principaux résultats de l'étude.

³ Il convient de noter que, même si les incertitudes concernant le changement climatique augmentent à mesure que se réduit la zone géographique étudiée, les modèles climatiques régionaux présentent l'avantage de décrire des phénomènes d'échelle réduite (du fait de leur résolution spatiale accrue sur la zone étudiée – actuellement 50 à 100 km, contre 200 à 300 km pour les modèles climatiques à grande échelle).

⁴ Présenté dans Climpact (2005).

⁵ Pour de plus amples informations sur les scénarios climatiques spécifiques, se reporter au rapport du GIEC (2007).

I. LES RESEAUX DE TRANSPORT FRANÇAIS

En 2007, les réseaux de transport en France étaient utilisés pour l'acheminement de plus de 881,1 milliards de voyageur-kilomètres (voy-km) et plus de 366 milliards de tonnes-kilomètres (t-km).⁶ (MEEDDAT, 2007:7-8). Avec des investissements estimés à 18,3 milliards d'euros pour la seule année 2007, ces réseaux représentent un investissement à long terme important (MEEDDAT, 2007:98).

Pour les besoins du présent rapport, les infrastructures de transport considérées ont été réparties en trois grandes catégories : transport terrestre (route et rail), transport par voie d'eau (fluvial et maritime) et transport aérien (aviation). Le transport peut également être subdivisé entre transport de passagers et transport de marchandises, qui, bien souvent, utilisent les mêmes grandes infrastructures.

Tableau 2 – Infrastructures de transport en France : longueur, utilisation et acteurs en 2007

Mode	Longueur/ Étendue*	Utilisation				Acteurs administratifs
		Voyageur		Fret		
		milliards de voy-km	%	milliards de t-km	%	
Transport routier	1 027 000 km	762.6	87%	323.3	87%	Direction Générale des Routes, DSCR, acteurs départementaux et locaux
Transport ferroviaire	29 213 km	105.3	12%	42.7	11%	Réseau Ferré de France, SNCF, RATP, Autorité organisatrice de transports (AOT)
Transport par voie d'eau	5 444 km	NA	NA	7.5	2%	Voies navigables de France (VNF), Compagnie nationale du Rhône (CNR), acteurs locaux
Transport aérien	155 terrains d'aviation enregistrés	13.2***	1%	NA	NA	MEEDDAT – Direction de l'Aviation, Aéroports de Paris (capital mixte) ; entreprises publiques contrôlées localement
Total, hors ports†		881.1		373.5		
Grands ports maritimes	7 Grand Ports Maritimes	NA**		304.4		MEEDDAT – Direction maritime

* Ces statistiques incluent exclusivement les sections en cours d'exploitation.

** 11,5 millions de passagers en provenance de l'étranger sont entrés en France par le port de Calais en 2007.

*** 125 millions de passagers (nationaux et internationaux) ont emprunté les aéroports français en 2007.

† Les ports ont été exclus du fait d'un manque d'informations complètes.

Source : Mission Climat of Caisse des Dépôts d'après MEEDDAT/SESP 2008 ; Réseau Ferré de France 2009.

⁶ Un voyageur-kilomètre (voy-km) est le produit entre la distance parcourue par un véhicule et le nombre de ses occupants. Une tonne-kilomètre (t-km) est une mesure équivalente utilisée pour le fret, à savoir le produit entre la distance parcourue par un véhicule et son tonnage.

Le présent chapitre décrit chaque catégorie d'infrastructure de transport, en précisant sa longueur/étendue, le nombre de passagers et le volume de fret ainsi que les acteurs engagés dans la construction, la maintenance et l'exploitation.⁷ La responsabilité administrative des différentes infrastructures de transport repose bien souvent sur un grand nombre d'acteurs. De fait, il peut s'avérer difficile de coordonner des efforts d'adaptation cohérents et complets. Le Tableau 2 résume les informations présentées dans ce chapitre.

A. Transport terrestre

Transport routier

Constitué de plus de 1 million de kilomètres en 2007, le réseau routier est l'infrastructure de transport la plus étendue et à la plus forte croissance en France. Administrativement, le système routier français se divise en trois catégories : les routes nationales, auxquelles s'ajoutent les autoroutes (20 638 km) ; les routes départementales (377 300 km) et les routes communales (628 987 km). Ce réseau inclut également d'importantes infrastructures complémentaires, comprenant notamment les équipements de signalisation et de sécurité, les panneaux, l'aménagement routier et les systèmes de drainage.

Le réseau routier est également l'infrastructure de transport la plus largement utilisée, avec 762,6 milliards de voyageur-kilomètres en 2007, soit 87 % du total national, dont 727,8 milliards de kilomètres (83 %) pour les véhicules privés et 34,8 milliards de kilomètres pour les transports publics routiers (4 %). Le réseau a permis l'acheminement de 323,3 milliards de tonnes-kilomètres de marchandises, soit là aussi 87 % du total national.

La responsabilité administrative des infrastructures routières est divisée entre différents acteurs publics et privés. Le réseau des routes nationales est géré principalement par le secteur public via la Direction Générale des Routes (DGR) et la Direction de la Sécurité et de la Circulation Routières (DSCR). En revanche, la gestion d'une partie des autoroutes a été déléguée à des opérateurs privés (8 000 km environ sur un total de 11 000 km). Les routes départementales et communales, quant à elles, sont gérées par le secteur public via des autorités administratives départementales et municipales compétentes. Plusieurs tunnels importants (autoroutes et tunnel du Mont Blanc, tunnel du Fréjus) sont gérés par des entreprises d'économie mixte.

Transport ferroviaire

En France, le réseau ferré s'étend sur 53 452 km de lignes ferroviaires principales en exploitation, dont 29 213 km sont ouvertes à la circulation commerciale. Parmi les lignes exploitées commercialement, 1 875 km sont des lignes à grande vitesse (LGV) et 15 164 km des lignes électrifiées (Réseau Ferré de France, 2009). En plus des équipements de signalisation et de sécurité requis, le haut niveau d'électrification du réseau impose un système de caténaires, de rails électrifiés et de stations électriques permettant de maintenir l'alimentation électrique nécessaire à la bonne exploitation du réseau.

En 2007, le réseau ferré était utilisé par plus de 105,3 milliards de voyageurs-kilomètres (12 % du total national), dont 36,1 milliards pour les systèmes de transport ferroviaire urbain et 69,2 milliards pour le réseau national principal. Au cours de la même période, le réseau ferroviaire assurait l'acheminement de 42,7 milliards de tonnes-kilomètres de marchandises (11 % du total national).

⁷ Sauf mention contraire, les informations ci-dessous sont fournies par le MEEDDAT (2008).

Au plan institutionnel, le réseau ferré français est principalement géré par l'État. En 1997, la responsabilité de la construction et de l'entretien du réseau ferré a été retirée à la SNCF, l'opérateur de transport ferroviaire national, et confiée à une entreprise publique nouvellement créée, Réseau Ferré de France (RFF). Les systèmes ferroviaires urbains, à l'exception de celui de Paris et de l'Île-de-France, sont gérés et exploités localement par des Autorités organisatrices de transports (AOT). En région parisienne, la gestion du réseau est assurée par la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens), opérateur public contrôlé par l'État. Depuis 2007, la responsabilité des lignes ferroviaires situées sur les ports autonomes a été dévolue par RFF à ces mêmes ports autonomes.

B. Transport par voie d'eau

Navigation intérieure

En France, le système de navigation intérieure inclut les fleuves, les rivières et les canaux, soit un ensemble de 8 501 km de voies d'eau, dont 5 444 km sont utilisés de façon régulière. Alors que la taille du réseau de navigation intérieure est restée pratiquement inchangée depuis 1980, avec une perte de longueur totale de 60 km seulement, la longueur des voies d'eau en exploitation a été réduite de 1 100 km (pour un total de 6 586 km en 1980). Cette situation reflète le recul général du recours au transport par voie d'eau. Le réseau de navigation intérieure comprend non seulement les rivières et canaux, mais également les écluses, réservoirs, barrages et systèmes de collecte d'eau, qui permettent à la fois de contrôler le niveau d'eau et de répondre aux différences de niveau du terrain.

En 2007, la navigation intérieure n'assurait le transport que de 7,5 milliards de tonnes-kilomètres (2 % du total national), soit un recul de 5,1 % par rapport à 2006. La part du fret transporté par barge a connu une baisse constante en faveur du transport routier au cours des dix dernières années. Les données sur le transport de voyageurs par voie d'eau n'étaient pas disponibles lors de la rédaction de cette étude.

Le réseau de navigation intérieure est géré par des entités publiques à différents niveaux de l'État. Voies navigables de France (VNF) est le principal établissement public national chargé de la maintenance du réseau des fleuves, rivières et canaux ouverts au transport de fret. Entreprise d'économie mixte, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est responsable de la gestion du Rhône ; la maintenance des canaux de la région parisienne et des canaux non ouverts au transport du fret revient quant à elle aux autorités locales. Les 32 principaux ports fluviaux français sont gérés par les Chambres de commerce et d'industrie locales, à l'exception de Paris, Strasbourg (port autonome, géré par le gouvernement central) et Lyon (géré par CNR).

Ports maritimes

En France, les ports maritimes se divisent en plusieurs catégories selon leur taille, leur importance relative et leur structure administrative propre. Les anciens « ports autonomes », rebaptisés « grands ports maritimes » en octobre 2008, sont les sept principaux ports maritimes français pour le fret, à savoir par ordre décroissant de trafic : Marseille, Le Havre, Dunkerque, Nantes-Saint-Nazaire, Rouen, Bordeaux et La Rochelle. Il existe par ailleurs 12 autres ports importants de taille variable, dont le principal est celui de Calais. Certains ports d'intérêt national (3 ports principaux) sont situés dans les départements et territoires d'outre-mer (DOM-TOM⁸). L'infrastructure portuaire inclut notamment les infrastructures de chargement et de déchargement (docks, jetées, grues, équipements pour conteneurs), ainsi que les structures de protection (môles, etc.). Les hubs d'interconnexion entre les réseaux de transport maritime, routier et ferré constituent également un élément important de l'infrastructure portuaire.

⁸ Les DOM-TOM sont les départements et territoires d'outre-mer, à savoir la Guadeloupe, la Réunion, la Guyane, la Polynésie française, la Martinique, Mayotte, la Nouvelle-Calédonie, Saint-Barthélemy, Saint-Martin, Saint-Pierre-et-Miquelon et Wallis-et-Futuna.

À eux seuls, les sept grands ports maritimes ont traité plus de 80 % du trafic commercial par voie d'eau en provenance et au départ de métropole, soit 304,4 millions de tonnes en 2007. Les 12 ports principaux de moindre envergure ont assuré l'importation et l'exportation de plus de 72,5 millions de tonnes. En termes de trafic voyageurs, le port de Calais a enregistré, à lui seul, plus 11,5 millions d'entrées et de sorties en 2007 (Port de Calais, 2009), le Port de Marseille enregistrant 2,04 millions de voyageurs au cours de cette même année (Port de Marseille, 2007).

Les sept grands ports maritimes sont actuellement placés sous le contrôle direct du gouvernement central ; leur changement de statut, décidé en 2008, tend néanmoins progressivement à concéder leur exploitation à des opérateurs privés. Les 12 ports de moindre envergure sont actuellement sous le contrôle administratif des collectivités locales. Dans les DOM-TOM, les trois principaux ports d'intérêt national sont placés sous le contrôle du gouvernement central, mais administrés localement par les chambres de commerce et d'industrie correspondantes.

C. Transport aérien

Le transport aérien connaît une constante progression en France ; le nombre total de voyageurs a ainsi connu une augmentation de 6,2 % en 2007. Avec plus de 450 terrains d'aviation, dont 155 membres de l'Union des Aéroports Français, la France dispose d'un réseau aérien très étendu pour les vols nationaux et internationaux. L'infrastructure aéroportuaire est composée des équipements de ravitaillement en carburant, des équipements de maintenance, des terminaux de voyageurs, des tarmacs et des pistes ainsi que des équipements de navigation (éclairage, tours de contrôle, etc.)

En 2007, les dix principaux aéroports français en termes de nombre de voyageurs étaient : Paris-Charles de Gaulle, Paris-Orly, Nice-Côte d'Azur, Lyon-Saint-Exupéry, Marseille-Provence, Toulouse-Blagnac, Bâle-Mulhouse, Bordeaux-Mérignac, Nantes-Atlantique et Beauvais-Tillé. Plus de 125 millions de voyageurs ont emprunté en 2007 le réseau de transport aérien sur l'ensemble du territoire, DOM-TOM compris. L'essentiel du trafic aérien s'effectue en Île-de-France : en 2007, les aéroports de Paris-Charles de Gaulle et de Paris-Orly ont représenté près de 60 % du trafic total voyageurs (transit exclu) en métropole. A la rédaction de cette étude, aucune donnée n'était disponible sur le transport aérien de fret.

Jusqu'à 2005, l'infrastructure aéroportuaire française était entièrement gérée par l'autorité publique. Cette même année, la société Aéroports de Paris (ADP), chargée de la gestion des deux aéroports de Paris-Charles de Gaulle et de Paris-Orly, a ouvert son capital au secteur privé et a procédé à son introduction en bourse. La loi a néanmoins imposé à l'Etat de demeurer actionnaire de contrôle.

Depuis 2007 et dans le cadre du processus de décentralisation, les administrations locales ont acquis le droit de créer des établissements publics contrôlés localement en vue de superviser la gestion des autres aéroports majeurs. C'est ce qui s'est produit à Lyon, Bordeaux et Toulouse. Tout aéroport ne rentrant pas dans les cas évoqués ci-dessus est placé sous le contrôle administratif de la chambre de commerce et d'industrie.

II. VULNERABILITE DU SYSTEME DE TRANSPORT FRANÇAIS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

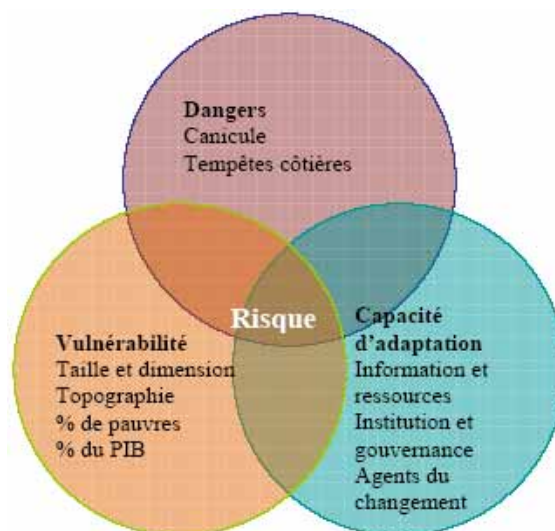
Considérer le changement climatique comme un problème de gestion du risque permet une approche s'articulant autour des trois éléments clés suivants : les dangers, la vulnérabilité et la capacité d'adaptation (Mehrotra *et al.*, 2009 :8-9).

Les *dangers* sont les événements climatiques tels que les canicules et tempêtes. Ceux-ci auront des incidences tant physiques qu'opérationnelles sur les infrastructures. Leur configuration, leur puissance et leur fréquence dépendra de l'évolution des moyennes climatiques.

La *vulnérabilité* d'un système donné, ici des infrastructures de transport, tient à ses caractéristiques physiques et à son environnement socio-économique qui déterminent l'exposition d'une infrastructure au changement climatique.⁹

Enfin, la *capacité d'adaptation* est la possibilité et la volonté de s'adapter des personnes chargées de fournir les services et infrastructures. La Figure 1 présente la configuration de ces différents éléments.

Figure 1 – Cadre général de l'évaluation du risque climatique



Source : Mehrotra et al., 2009.

Ce chapitre de l'étude abordera la vulnérabilité du réseau français d'infrastructures de transport (décrit ci-dessus) aux impacts potentiels du changement climatique, en se fondant sur le rapport 2005 de Climact intitulé *Les changements climatiques : quels impacts en France ?*, et les travaux de modélisation de l'IMFREX¹⁰ (2007). Comme dit précédemment, les concentrations accrues de gaz à effet de serre affecteront à la fois les tendances climatiques moyennes et la fréquence et l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes. L'analyse tiendra compte des deux aspects, en distinguant d'une part l'incidence sur les infrastructures physiques et d'autre part l'incidence sur l'exploitation de ces dernières. À l'instar du rapport de Climact (2005), l'analyse se fondera sur les prédictions découlant des scénarios A2 et B2¹¹ présentés dans le quatrième rapport d'évaluation du GIEC. La modélisation régionale réalisée par Météo France et l'IPSL a été déclinée en trois scénarios pour le territoire métropolitain français.¹²

⁹ Le quatrième rapport d'évaluation du GIEC (2007) définit la vulnérabilité comme étant le « degré selon lequel un système est susceptible, ou se révèle incapable, de faire face aux effets néfastes du changement climatique, notamment à la variabilité du climat et aux conditions climatiques extrêmes. La vulnérabilité est fonction de la nature, de l'importance et du taux de variation climatique auxquels un système se trouve exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation. »

¹⁰ IMFREX (IMpact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations) est un projet conjoint conduit notamment par Météo France et l'IPSL.

¹¹ Le scénario A2 se fonde sur un monde hétérogène, caractérisé par un développement économique obéissant principalement à une orientation régionale, par une augmentation de la population continue et par un développement comparativement faible des technologies à faibles émissions. Le scénario B2 se fonde sur un monde où l'accent est mis sur les solutions locales en matière de viabilité économique, sociale et environnementale, une croissance de la population inférieure à celle du scénario A2, et un développement modéré mais diversifié des technologies à faibles émissions.

¹² Si la vulnérabilité des ports à l'élévation du niveau de la mer n'est pas évaluée ici du fait du manque de données disponibles, elle est incluse dans le tableau de l'Annexe 2, qui résume les impacts physiques et opérationnels potentiels dus au changement climatique.

A. Une vulnérabilité accrue aux conditions climatiques moyennes et extrêmes

Plusieurs études mondiales, nationales et régionales¹³ ont commencé à mettre l'accent sur les impacts physiques susceptibles d'affecter les infrastructures de transport du fait de l'évolution des moyennes climatiques (élévation du niveau de la mer, températures, précipitations, humidité, cycles de gel et dégel, etc.). Naturellement, la portée et l'intensité relative de l'évolution des moyennes climatiques dépendent largement de la localisation et du contexte ainsi que du type d'infrastructure concerné (route, rail, maritime, etc.). Les infrastructures de transport apparaissent davantage sensibles aux conditions climatiques extrêmes qu'à un changement des moyennes climatiques. Comme le souligne Thomas Peterson, évoquant les États-Unis, « [...] la sensibilité aux conditions climatiques moyennes est moindre qu'aux conditions climatiques extrêmes. [...] De fait, la variabilité et les changements climatiques ont une incidence sur le transport principalement dans le cas de conditions extrêmes » (2006:1).

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes entraînera toute une série de répercussions négatives sur les infrastructures de transport. Il est néanmoins important d'identifier les régions et les infrastructures pour lesquelles le risque sera potentiellement plus important dans le cas d'un changement du niveau moyen de température ou de précipitations. Ce chapitre étudie les impacts potentiels des changements dans les tendances moyennes et les extrêmes de températures.

Tendances des températures moyennes

Les deux scénarios du GIEC A2 et B2 prévoient une augmentation des températures moyennes en France. En se fondant sur ces scénarios, les modèles de Météo France et de l'IPSL supposent que, d'ici à 2070-2099, les températures moyennes annuelles en France pourraient augmenter de 2 à 3,5 °C par rapport aux niveaux de 1960-1989. Comme le montre le Tableau 3, la modélisation du scénario B2 prévoit une augmentation potentielle de 2 à 2,5 °C d'ici à 2070-2099. La modélisation du scénario A2 montre une augmentation encore supérieure de la température moyenne annuelle, de 3 à 3,5 °C.

Tableau 3 – Augmentation moyenne attendue des températures en France pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1960-1989

	Températures		
	Moyenne annuelle	Hiver	Été
Scénario B2	2 à 2,5 °C	1,5 à 2 °C	2,5 à 3,5 °C
Scénario A2	3 à 3,5 °C	2,5 à 3 °C	4 à 5 °C

Source : Climapact (2005).

Dans les deux scénarios, le réchauffement serait plus important en été qu'en hiver. Comme le souligne Climapact (2005), même si les augmentations de la température moyenne devaient être modérées, il conviendrait de les comparer aux variations actuelles de la température moyenne en France : toutes choses égales par ailleurs, un changement de latitude de 200 km entraîne aujourd'hui un changement de 1 °C de la température (Mansanet *et al.*, 2008). Le modèle A2¹⁴, par exemple, montre que le réchauffement en France pourrait dépasser 3 °C dans certaines régions. Les augmentations les plus fortes (plus de 5 °C) interviendraient dans la région Centre-Ouest. De fait, la gestion des infrastructures de transport ne sera pas identique dans toutes les régions françaises.

¹³ Cf. Koetse & Rietveld, 2009; TRB, 2008; USCCSP, 2008; Ressources naturelles Canada, 2008; Gouvernement de Victoria, 2007.

¹⁴ Par souci de concision, nous n'avons pris en considération ici que le cas du scénario A2. Ce scénario fait état d'une plus large gamme de phénomènes climatiques parmi les régions françaises.

La littérature montre que l'évolution des moyennes et des extrêmes de température conduirait principalement à l'augmentation de l'usure des infrastructures liée à la température. De la même façon, l'augmentation de la température est susceptible d'avoir des incidences d'ordre opérationnel, qu'il s'agisse du bon fonctionnement d'un réseau ferroviaire du fait de la dilatation thermique des rails ou encore de la capacité des réacteurs d'avions à fonctionner normalement à des températures élevées. Plusieurs impacts indirects sont également envisageables, tels que le changement de comportement des conducteurs au volant provoqué par les températures élevées (stress lié à la chaleur) ou la baisse de visibilité – quel que soit le mode de transport – du fait de l'augmentation de l'activité des feux de forêt (Koetse & Rietveld, 2008).

Les Figures 2 à 5 présentent la localisation des infrastructures de transport¹⁵ et leur exposition à l'évolution des températures moyennes et extrêmes entre 2070 et 2099. L'impact sera variable en fonction des régions et du réseau de transport concerné.

Les Tableaux 4 à 8 résument l'impact potentiel d'une évolution des températures moyennes, tel que décrit dans la littérature¹⁶.

L'analyse présentée ci-dessous doit être considérée uniquement à titre indicatif, étant donné qu'il existe encore des incertitudes importantes quant à l'évolution des tendances de températures. De même, les spécifications techniques des infrastructures sont déjà extrêmement diverses sur le territoire, rendant toute prévision difficile en l'absence d'informations complémentaires. Ainsi, alors que les méthodes de construction de la plateforme routière sont similaires sur l'ensemble du territoire français, le type de chaussée utilisée varie d'une région à l'autre.

Infrastructures ferroviaires

Comme le montre la Figure 2, une part relativement importante des infrastructures ferroviaires françaises, y compris les lignes conventionnelles et à grande vitesse, se trouveront dans des zones affectées par l'évolution des températures moyennes et extrêmes. Comme l'indique le Tableau 4, le changement de températures peut provoquer une dilatation ou une déformation des rails, entraînant des mouvements de voies. Outre le coût de la réparation de ces dommages physiques, une telle situation peut entraîner un certain nombre d'impacts d'ordre opérationnel, notamment une baisse des vitesses d'exploitation, une réduction de la charge payante et une éventuelle interruption totale du service.

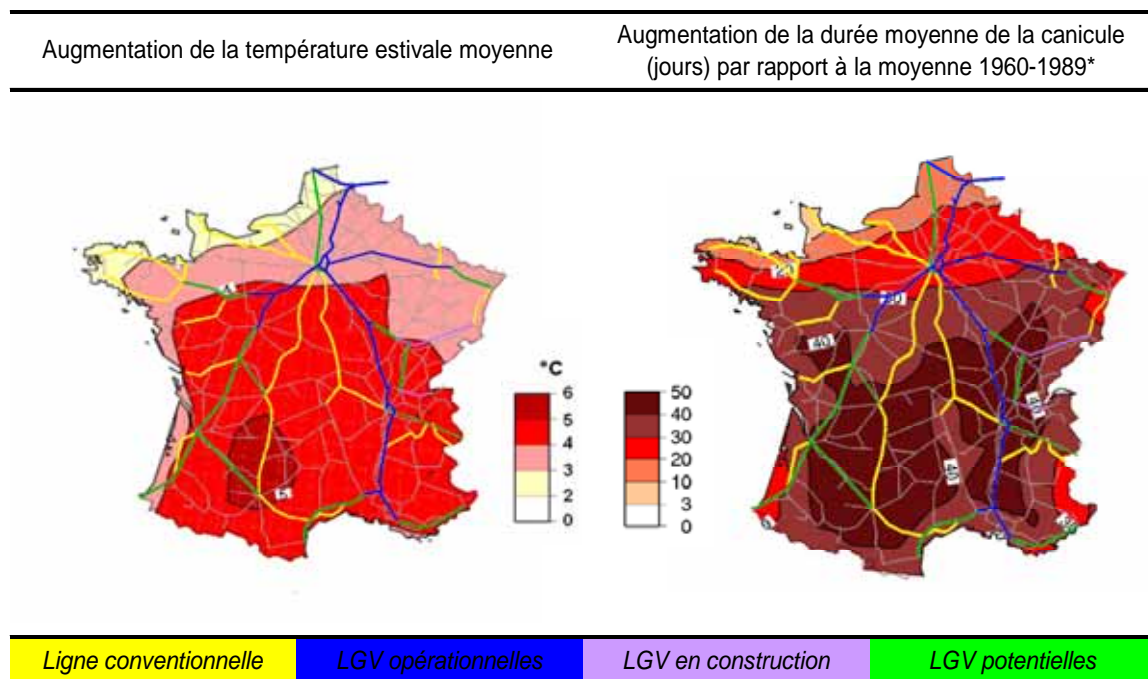
La canicule de 2003 a fourni un bon exemple des conséquences d'une telle situation. Elle a provoqué plusieurs interruptions dans l'exploitation normale des services de la SNCF. Par ailleurs, en plus des désagréments extrêmes causés aux voyageurs du fait de voitures surchauffées, la dilatation et déformation des rails a entraîné des retards fréquents et significatifs. Durant cette période, la SNCF a enregistré une réduction de la régularité de ses trains de 10 points à 77 % contre 85-87 % pour la même période de 2001 et 2002. Au-delà même des conséquences économiques indirectes multiples, une telle situation a entraîné des pertes comprises entre 1 et 3 millions d'euros, découlant des engagements de remboursement garanti en fonction de l'heure d'arrivée. (Létard, 2004). Si certains ont souligné que le type de rails utilisés pour la construction des lignes à grand vitesse (LGV) est moins sujet à une déformation par la chaleur, on ne sait pas encore jusqu'à quelle température extrême cette situation se vérifie. Par ailleurs, au-delà des impacts directs, les changements climatiques décrits ci-dessus peuvent, dans certains domaines, augmenter la survenue de feux sauvages et de chutes d'arbres, conduisant à des dommages physiques et à des interruptions d'exploitation.

¹⁵ Les ports maritimes n'ont pas été analysés ici du fait de données disponibles insuffisantes sur leur élévation et leur degré d'exposition à une augmentation du niveau de la mer.

¹⁶ En France, l'évaluation de l'impact d'une évolution des températures moyennes et des températures extrêmes supérieures dépend des normes climatiques appliquées lors de la construction des infrastructures. Ce type d'informations n'était pas disponible lors de la rédaction de cette étude.

Comme on peut le constater, l'infrastructure ferroviaire se limite à un petit nombre de corridors, avec des connexions ou nœuds concentrés dans certaines zones urbaines (Paris, Bordeaux, Toulouse, Lyon et Avignon). Notre analyse souligne que deux des principaux corridors (la vallée du Rhône et la liaison Espagne-Italie par la côte méditerranéenne) semblent se situer dans des zones susceptibles de connaître d'importantes variations de températures.

Figure 2 – Infrastructures ferroviaires actuelles et prévisions climatiques estivales pour la période 2070-2099 selon le scénario A2



* Évolution de la durée moyenne de la canicule (nombre de jours par période dans laquelle, dans un intervalle d'au moins six jours consécutifs, la température dépasse de plus de 5 °C la moyenne 1960-1989 sur une fenêtre de cinq jours centrée sur le même jour calendaire) entre les décennies de 2100 et la période 1960-1989.

Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts d'après Clim'act (2005) ; RFF (2009).

Tableau 4 – Impacts potentiels de l'évolution des températures sur l'infrastructure ferroviaire

Risques physiques	Variable climatique	Impacts opérationnels
Mouvement des rails	Augmentation de la température et canicule Baisse de l'humidité disponible	Baisse des vitesses d'exploitation Baisse de la charge payante Augmentation du suivi de la température des rails Augmentation de la maintenance
Dommages incendies sur les rails	Baisse de la variation des périodes humique/sèche Baisse de l'humidité disponible	Visibilité réduite

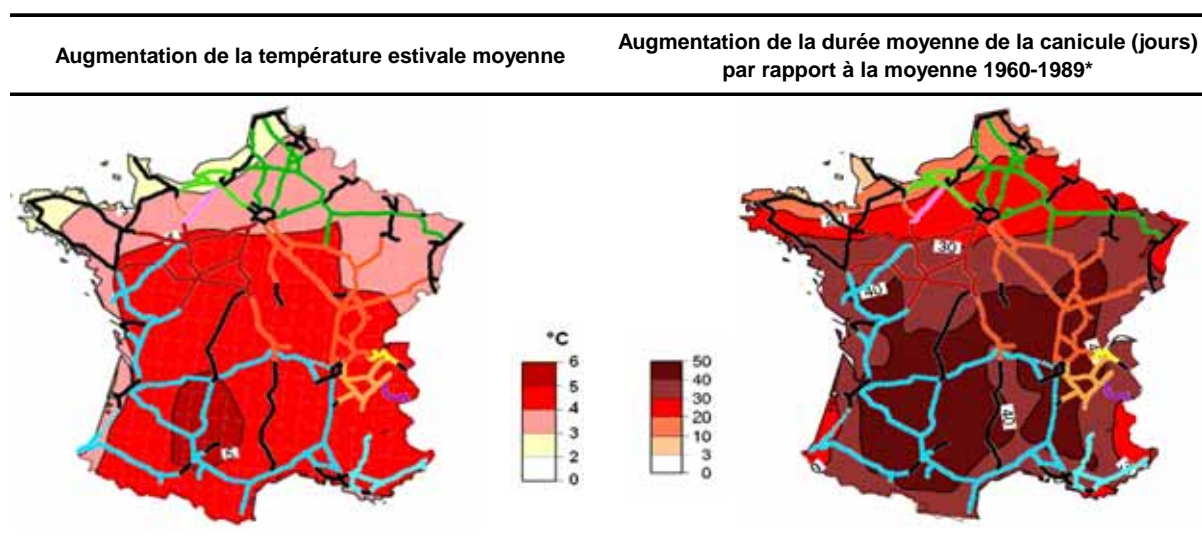
Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts, après CSIRO 2007, RN Canada 2008, USCCS 2008, TSB 2008.

Infrastructures routières

Comme le montre la Figure 3, une part importante des infrastructures routières se situent dans des zones où il est probable qu'on enregistre une augmentation de la température moyenne et de la fréquence des événements de températures extrêmes. L'évolution de la température moyenne peut entraîner des phénomènes physiques tels que la dégradation de l'asphalte, la détérioration des fondations routières (liés à la réduction de l'humidité du sol) ainsi que des dommages accrus provoqués par des feux sauvages.

Ces phénomènes peuvent engendrer toute une série d'impacts opérationnels, y compris des réductions de vitesse, une limitation des périodes de construction, des incidences néfastes sur les véhicules et une baisse de visibilité dues aux feux sauvages. Les recherches concernant l'impact de la température sur le comportement des conducteurs au volant indiquent quant à elles une augmentation du risque d'accidents du fait de conditions de stress lié à la chaleur (Stern & Zehavi, 1990 cité par Koetse & Rietveld, 2009:213).

Figure 3 – Principales autoroutes actuelles et prévisions climatiques estivales pour la période 2070-2099 selon le scénario A2*



* Les différentes couleurs représentent les divers opérateurs concessionnaires exploitant les infrastructures, les tronçons noirs représentant les sections non concédées.

** Évolution de la durée moyenne de la canicule (nombre de jours par période dans laquelle, dans un intervalle d'au moins six jours consécutifs, la température dépasse de plus de 5 °C la moyenne 1960-1989 sur une fenêtre de cinq jours centrée sur le même jour calendaire) entre les décennies de 2100 et la période 1960-1989.

Source : Mission Climat d'après Climact (2005); MEEDDAT (2009).

Tableau 5 – Impacts potentiels de l'évolution des températures sur l'infrastructure routière

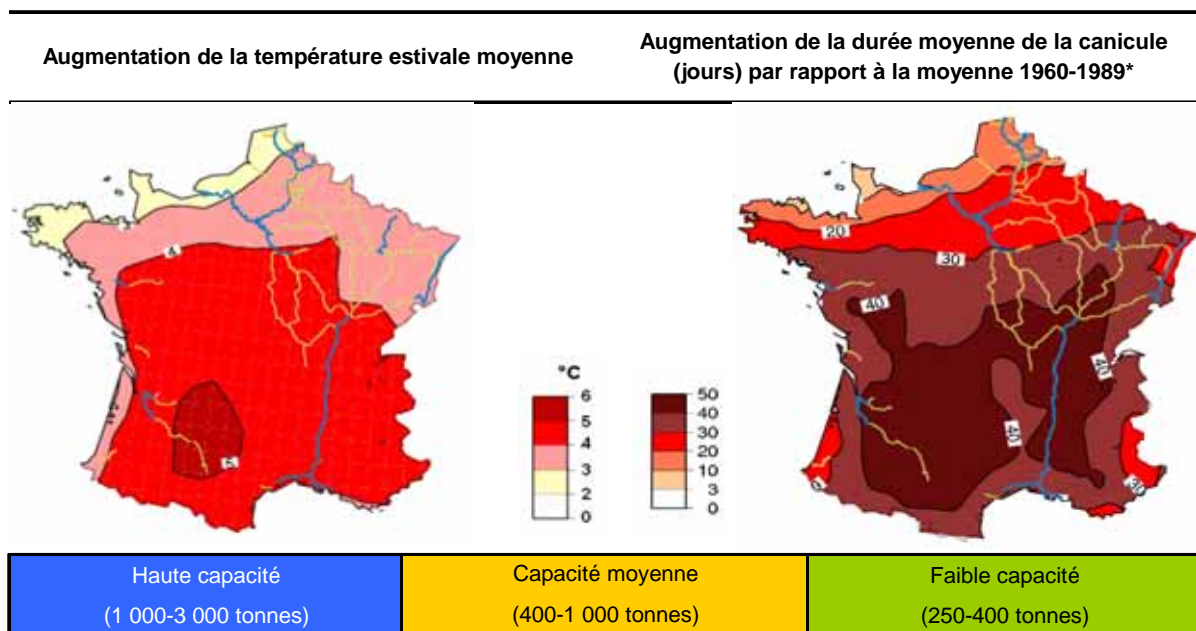
Risques physiques	Variable climatique	Impacts opérationnels
Dégradation de l'asphalte (ornières, déformations)	Augmentation du rayonnement solaire	Baisse des vitesses d'exploitation
	Augmentation de la température et canicule Augmentation des cycles gel/dégel (hivers doux)	Augmentation de la maintenance Limitation des périodes de construction
Détérioration des fondations routières	Variation accrue des périodes humides/sèches Baisse de l'humidité disponible Élévation du niveau de la mer	Surchauffe des véhicules et détérioration des pneus
Domages incendies sur l'infrastructure routière	Variation accrue des périodes humides/sèches Baisse de l'humidité disponible	Visibilité réduite
Changements dans l'aménagement et la végétation des bords de routes	Évolution des précipitations	
	Évolution des températures	

Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts, d'après CSIRO 2007, RN Canada, USCCS 2008, TSB 2008.

Navigation intérieure

L'augmentation de la température moyenne ainsi que de la fréquence et de l'intensité des événements de températures extrêmes est susceptible de réduire la disponibilité des ressources en eau suffisantes pour une exploitation efficace des voies d'eau intérieures.

Figure 4 – Infrastructure actuelle de navigation intérieure et prévisions climatiques estivales pour la période 2070-2099 selon le scénario A2



* Évolution de la durée moyenne de la canicule (nombre de jours par période dans laquelle, dans un intervalle d'au moins six jours consécutifs, la température dépasse de plus de 5 °C la moyenne 1960-1989 sur une fenêtre de cinq jours centrée sur le même jour calendaire) entre les décennies de 2100 et la période 1960-1989.

Source : Mission Climat d'après Clim pact (2005); Voies Navigables de France (2009).

Tableau 6 - Impacts potentiels de l'évolution des températures sur les infrastructures de navigation intérieure

Risques physiques	Variable climatique	Impacts opérationnels
Diminution du niveau des eaux	Diminution des pluies Augmentation de la température et canicules	Diminution de la charge payante Conflits liés à l'allocation et au partage des ressources hydriques
Croissance accrue des plantes aquatiques	Augmentation des températures	Demandes accrues de dragage Engorgement des conduites d'approvisionnement et des égouts

Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts, d'après CSIRO 2007, RN Canada 2008, USCCS 2008, TSB 2008.

La réduction importante du niveau des eaux, liée à l'évaporation et à l'augmentation de la vitesse des cycles hydrauliques saisonniers¹⁷, devrait moins affecter les grands fleuves tels que la Seine et le Rhône.

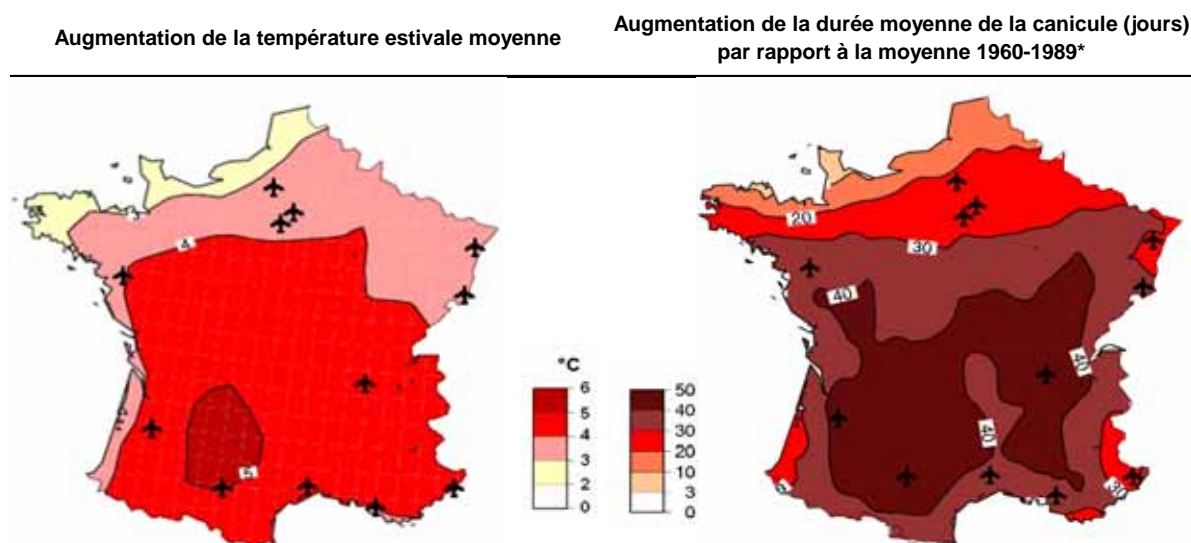
¹⁷ Pour de plus amples informations, se reporter aux travaux de J. Boe (2007) sur les changements potentiels du cours des fleuves, Y. Caballero (2003) pour la Garonne, A. Ducharme (2008) pour la Seine, et B. Manoha (2007) pour la Loire et le Rhône.

En revanche, les canaux et autres voies navigables intérieures pourraient connaître une baisse de leurs apports en eau et une multiplication des situations conflictuelles liées à l'allocation et au partage des ressources en eau destinées à la fois à l'agriculture et aux zones urbanisées. L'augmentation de la température moyenne pourrait également conduire à une croissance des plantes aquatiques invasives, entraînant un engorgement des conduites d'alimentation en eau et des égouts ainsi qu'une demande croissante de prestations de nettoyage, maintenance et dragage.

Transport aérien

On s'attend dans le secteur aérien à des progrès technologiques visant à compenser l'impact négatif des hausses de températures sur la poussée aérostatique et l'efficacité des moteurs¹⁸ (TRB 2009) ; en revanche, un certain nombre d'autres impacts pourraient affecter les infrastructures du transport aérien.

Figure 5 – Localisation actuelle des aéroports et prévisions climatiques estivales pour la période 2070-2099 selon le scénario A2



* Évolution de la durée moyenne de la canicule (nombre de jours par période dans laquelle, dans un intervalle d'au moins six jours consécutifs, la température dépasse de plus de 5 °C la moyenne 1960-1989 sur une fenêtre de cinq jours centrée sur le même jour calendaire) entre les décennies de 2100 et la période 1960-1989.

Source : Mission Climat d'après Climact (2005).

Tableau 7 - Impacts potentiels de l'évolution des températures sur les infrastructures du transport aérien

Risques physiques	Variable climatique	Impacts opérationnels
Dégradation de l'asphalte	Augmentation du rayonnement solaire Augmentation de la température et canicule	Baisse de la charge payante Augmentation du suivi des conditions des pistes Augmentation de la maintenance
Dégradation des fondations des pistes	Variation accrue des périodes humides/sèches Baisse de l'humidité disponible	
Perte d'efficacité moteur	Augmentation de la température et canicule	

Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts, d'après CSIRO 2007, RN Canada 2008, USCCS 2008, TSB 2008.

¹⁸ En dépit des améliorations apportées aux technologies aériennes, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de températures extrêmes peut entraîner une perte de l'efficacité des moteurs.

À l'instar des routes, les tarmacs et pistes pourraient souffrir d'une dégradation de l'asphalte ainsi que d'une déformation des fondations des pistes imputables à l'évolution de l'humidité du sol.

Tendances des précipitations

L'évolution de la répartition des précipitations affectera également les réseaux français des transports. Le Tableau 8 présente l'évolution attendue des précipitations moyennes pour la période 2070-2099 par rapport aux moyennes 1960-1989 pour les scénarios A2 et B2, suivant les simulations de Météo France et de l'IPSL et présenté par Climact (2005).

**Tableau 8 – Évolution moyenne attendue des précipitations
pour la période 2070-2099 par rapport à 1960-1989**

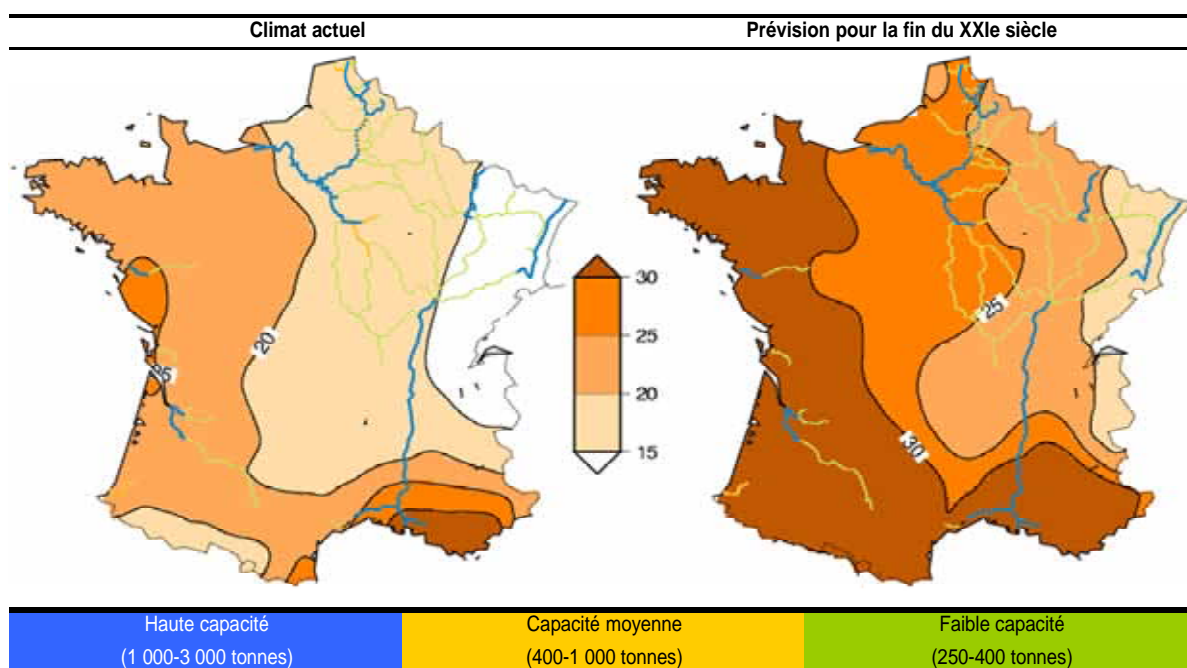
	Précipitations		
	Moyenne annuelle	Hiver	Été
Scénario B2	-5 % à 0	0 à +10 %	-25 à -5 %
Scénario A2	-10 % à 0	+5 à +20 %	-35 à -20 %

Source : Climact (2005).

Selon le modèle choisi, les précipitations pourraient être légèrement supérieures en hiver et sensiblement réduites en été. Sur l'ensemble d'une année, les précipitations pourraient ainsi diminuer, mais seulement d'un faible pourcentage. Ces résultats sont plus prononcés si nous considérons le scénario A2 du GIEC. Comme l'indique Climact (2005), l'évolution des précipitations sera variable en fonction des régions françaises.

Les Figures 6-7 montrent les changements potentiels de répartition des précipitations hivernales et estivales à la fin du XXI^e siècle selon le modèle ARPEGE. Comme le souligne le Tableau 8, on prévoit une augmentation du nombre maximum de jours secs consécutifs au cours des mois d'été. La baisse des précipitations en été pourrait réduire la quantité d'eau disponible, altérant le bon fonctionnement des voies de navigation intérieure, et conduire ainsi à des réductions de capacités des barges, voire à des interruptions de service. Une part significative du réseau de navigation intérieure est située au sein de régions potentiellement affectées, principalement dans le sud de la France.

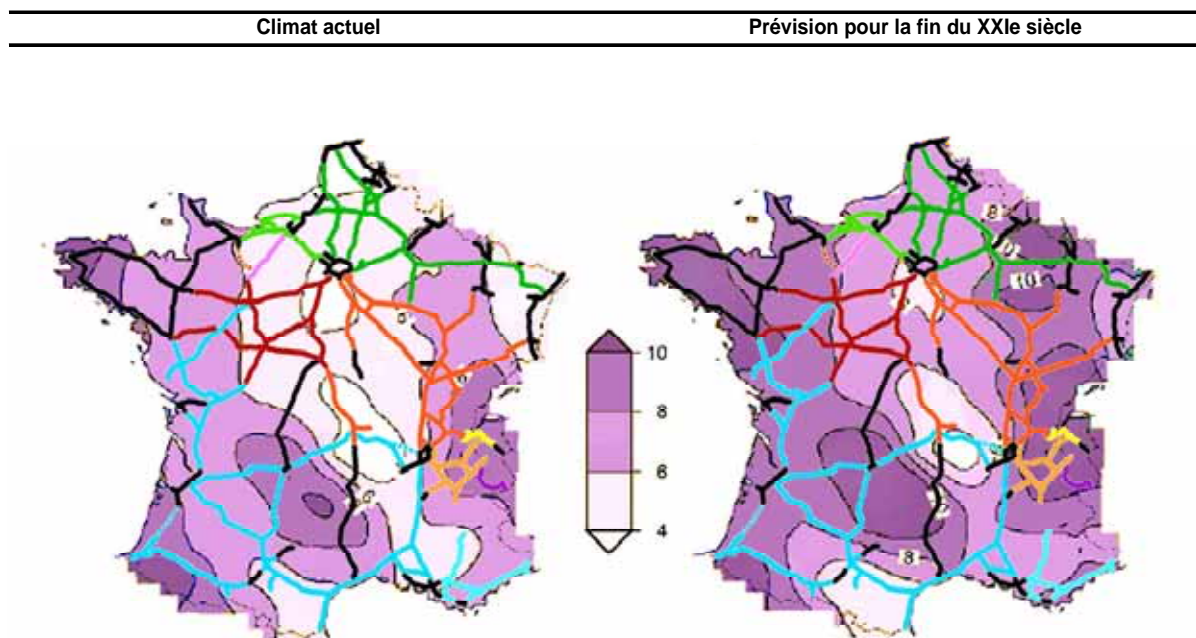
Figure 6 – Voies de navigation intérieure et nombre maximum de jours secs consécutifs au cours de l'été, selon le modèle ARPEGE



Source : Mission Climat d'après IMFREX (2007) ; Voies navigables de France (2009).

Comme le montre la Figure 7, on prévoit une augmentation des précipitations pendant les mois d'hiver dans de nombreuses régions, augmentation susceptible d'entraîner une multiplication des phénomènes d'inondation. Le Tableau 9 présente les risques potentiels physiques et opérationnels d'une augmentation des précipitations.

Figure 7 - Principales autoroutes actuelles et nombre de jours d'hiver connaissant plus de 10 mm de précipitation selon le modèle ARPEGE*



* Les différentes couleurs représentent les différents opérateurs concessionnaires exploitant les infrastructures, les zones en noir étant les sections sans concession.

Source : Observatoire de l'énergie et IMFREX (2007) ; MEEDDAT (2009).

Tableau 9 - Impacts potentiels de l'évolution des précipitations sur l'infrastructure routière

Risques physiques	Variable climatique	Impacts opérationnels
Inondations des routes (chaussées, remblais)	Augmentation des précipitations extrêmes journalières	Baisse des vitesses d'exploitation
	Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes	Augmentation de la maintenance Limitation des périodes de construction Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations
Changements dans l'aménagement et la végétation des bords de routes	Évolution des précipitations	Visibilité réduite
	Évolution des températures	

Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts, après CSIRO 2007, Ressources naturelles Canada 2008, USCCS 2008, TSB 2008.

Dans plusieurs régions, les phénomènes d'inondation posent déjà de multiples difficultés pour l'exploitation efficace des infrastructures de transport, conduisant à plusieurs fermetures de routes et à de coûteuses réparations. Des situations comparables pourraient affecter les infrastructures de transport ferroviaire et aérien. L'augmentation des précipitations en hiver pourraient entraîner des coûts de maintenance accrus et une baisse de la durée de vie des infrastructures ainsi que des dysfonctionnements opérationnels. En outre, la fonte du manteau neigeux hors saison pourrait constituer un risque accru d'inondation.

Une étude portant sur les cas d'inondations dans le bassin Artois-Picardie, où sont situées les villes d'Amiens et de Lille (Nord de la France), souligne l'ampleur relative des dommages provoqués sur les infrastructures de transport par rapport à la totalité des dommages enregistrés. En effet, l'ensemble des dommages provoqués par les fortes inondations de 2001 dans le bassin de la Somme ont été estimés entre 140 et 160 millions d'euros, dont 55 millions pour les dommages et pertes opérationnelles liés aux infrastructures routières et 2,3 millions pour les infrastructures ferroviaires. Globalement, le volet transports de 60 millions d'euros a représenté 40 % environ du coût total des inondations (Ecodecision, 2006).

Alors que les précipitations nettes annuelles pourraient ne pas connaître de changement significatif, la hausse des précipitations en hiver ne devrait pas être en mesure de contrebalancer l'augmentation des périodes sèches au cours de l'été ; en effet, l'humidité en hiver se présentera principalement sous forme de pluies, du fait de l'augmentation des températures annuelles moyennes et la baisse potentielle du manteau neigeux (IMFRET, 2007).

B. Vulnérabilité à l'évolution des phénomènes extrêmes de vent

Comme nous l'avons indiqué plus haut, l'évolution de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère conduira également à une augmentation de la fréquence et de la gravité des phénomènes extrêmes de vent. 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. Certains résultats indicatifs sont toutefois disponibles grâce aux travaux de modélisation de l'IMFRET qui utilisent les modèles ARPEGE et LMDz. On prévoit ainsi de faibles augmentations de la vitesse des vents les plus forts sur la partie septentrionale du pays, le sud ne connaissant qu'une faible baisse ou aucune évolution significative (Planton, 2008:573).

Toutefois, comme l'a illustré la tempête Klaus qui s'est abattue sur le sud-ouest de la France en janvier 2009, des vents extrêmes peuvent entraîner des conséquences majeures sur les réseaux de transport. Dans ce cas précis, les services ferroviaires ont été largement restreints entre Bordeaux et Toulouse ainsi que dans toute la région du sud-ouest pendant plusieurs jours du fait de chutes d'arbres et de coupures dans l'alimentation électrique des équipements de signalisation et d'exploitation (*Le Figaro*, 2009). Si les données précises relatives aux coûts de cette tempête pour la SNCF et RFF ne sont pas disponibles, 1 500 km de rails ont néanmoins été affectés. Cette situation a contraint à une mobilisation de plus de 1 000 agents de la SNCF, le trafic ferroviaire n'étant revenu à la normale qu'au bout d'une à deux semaines (LCI.fr, 2009).

La littérature indique que les coûts des dommages provoqués sur les infrastructures par une élévation du niveau de la mer, les inondations et les marées de tempêtes provoquées par le vent, seront importants, notamment lorsqu'ils sont conjugués à d'autres événements climatiques extrêmes, comme nous l'ont montré les dommages causés par les ouragans Rita et Katrina (Koetse & Rietveld, 2009). En outre, une augmentation du nombre et de la fréquence des tempêtes et des vents extrêmes aura un impact particulièrement négatif sur l'exploitation des infrastructures de transport aérien, pour lesquelles une augmentation de la vitesse du vent et/ou une baisse de la visibilité peuvent provoquer des retards significatifs.

C. Implications en termes d'exploitation et d'utilisation des infrastructures de transport

Au-delà des dégradations physiques, l'évolution des moyennes climatiques pourrait entraîner une réduction ou une modification de l'utilisation des infrastructures routières ; en effet, les conditions d'exploitation habituelles pourraient excéder les normes de construction de ces infrastructures. L'évolution des moyennes et des extrêmes climatiques aura toute une série d'incidences sur l'exploitation quotidienne des infrastructures de transport, leur fiabilité et leur capacité à rester opérationnelles au cours d'événements climatiques extrêmes de plus en plus fréquents et intenses.

Encore une fois, ce sont les phénomènes climatiques extrêmes qui constituent les plus grands défis, étant donné que leur multiplication (précipitations, chaleur, froid ou vents extrêmes) peut affecter à la fois la sécurité des infrastructures et leur capacité d'utilisation, conduisant à des réductions de service, à des vitesses d'exploitation limitées et à des dysfonctionnements complets des systèmes. L'évolution des phénomènes climatiques moyens et extrêmes peut ainsi accroître la fréquence et les coûts des travaux d'entretien et de maintenance des infrastructures.

En plus des infrastructures liées à l'exploitation d'un mode de transport donné, certaines autres infrastructures, telles que les ponts et les tunnels, sont également sujets à l'évolution des températures et des précipitations, comme le montre le Tableau 10. Les travaux menés en Nouvelle-Zélande (Kinsella & McGuire, 2006) ont démontré que les ponts et aqueducs dont la conception remonte à plus de 25 ans ne sont plus totalement protégés des impacts potentiels du changement climatique par les politiques actuelles. En effet, cette étude analyse un scénario politique dans lequel aucune action n'a été entreprise et indique que le montant total des coûts d'urgence d'ici à 2080 pourrait atteindre 711 millions de dollars néo-zélandais (320 millions euros), sans compter les pertes économiques et sociales imputables à des services de transports défaillants, etc.

**Tableau 10 – Impacts potentiels de l'évolution des températures
sur d'autres infrastructures liées aux transports**

Risques physiques		Variable climatique	Impacts opérationnels
Ponts	Dégradation matérielle de la structure du pont	Augmentation de la température et canicule Augmentation du rayonnement solaire	Augmentation du suivi des structures Augmentation de la maintenance
	Dommages provoqués par des tempêtes	Augmentation des précipitations extrêmes journalières Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes Augmentation de l'intensité des vents extrêmes	Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations
Tunnels	Inondation	Augmentation des précipitations extrêmes journalières Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes Élévation du niveau de la mer	Augmentation du suivi des structures Augmentation de la maintenance Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations

Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts, après CSIRO 2007, Ressources naturelles Canada 2008, USCCS 2008, TSB 2008.

Le Tableau de l'Annexe 2 résume les différents types d'impacts sur l'exploitation des infrastructures de transport, pour chaque type de transport étudié. Globalement, il est important de noter que l'évolution des conditions climatiques moyennes et extrêmes entraînera une réduction potentielle de l'efficacité des systèmes et de leur performance avec des conséquences importantes pour les activités économiques et sociales qui en dépendent. Les systèmes de transport sont extrêmement sensibles aux effets d'interruptions liées au climat, dans lesquelles un incident affectant une simple partie du réseau peut provoquer des perturbations étendues et entraîner des coûts indirects importants du fait de retards, de déviations et d'annulations de voyages (Koetse & Rietveld, 2009).

D. Implications en termes de demande d'infrastructures de transport

Les sections précédentes se sont concentrées pour l'essentiel sur l'offre des infrastructures de transport. Or, la demande de mobilité pourrait se trouver également affectée par le changement climatique et constituer un facteur important dans la localisation et l'exploitation de futures infrastructures. Au fil du temps, l'évolution des moyennes climatiques peut également influencer les structures opérationnelles et le comportement des usagers, avec une modification des principaux flux de voyageurs et de fret. Comme le rapporte la littérature à ce sujet, l'évolution des moyennes climatiques aura une incidence sur plusieurs secteurs économiques, y compris le tourisme et l'agriculture, influençant la demande de mobilité entre régions (Koetse & Rietveld, 2009).

Des études portant sur les flux touristiques dans les pays européens mettent en évidence une augmentation potentielle des flux de touristes vers le nord de l'Europe en été, une partie de l'Europe du sud perdant de son attractivité relative. Ce processus se trouve toutefois inversé au cours des mois de printemps et d'hiver, traduisant un transfert des flux saisonniers dans ces régions des mois d'été aux mois d'hiver (Nicholls et Amelung, 2008 ; Amelung et Viner, 2006 cité par Koetse & Rietveld, 2009). D'autres études ont également été menées concernant l'évolution de la demande en matière de vacances au ski en hiver (*pour un résumé, se reporter à Koetse & Rietveld, 2009*). Comme le suggèrent les figures ci-dessus, l'évolution des températures hivernales et estivales est susceptible de provoquer une augmentation des flux touristiques vers les côtes normandes et bretonnes au cours des mois d'été et vers la Côte d'Azur pendant le printemps et l'hiver.

Koetse & Rietveld décrivent également les changements potentiels affectant le transport de produits agricoles. Alors que l'impact du changement climatique sur les différentes composantes de l'agriculture reste, pour l'heure, plus incertain que celui affectant un secteur tel que le ski, on peut supposer qu'au niveau mondial, les pays situés dans les latitudes Nord seront mieux adaptés à la production agricole (Easterling *et al.*, 2007 *cité par Koetse & Rietveld, 2009*). Bien que la production agricole française puisse s'en trouver modifiée, les changements toucheraient surtout le Sud où l'augmentation de la température (plus de 3 °C) est supposée réduire les rendements (GIEC, 2007). Des changements pourraient également intervenir dans les conditions de transports de ces produits. Ces tendances, toutefois, ne peuvent être évaluées qu'à un niveau global et il est de fait difficile d'extrapoler à partir d'impacts spécifiques.

III. ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, l'impact du changement climatique sera variable en fonction des zones du territoire français et des modes de transports concernés. L'objectif des actions d'adaptation reste néanmoins le même : garantir que le réseau aura la capacité de satisfaire les demandes d'accessibilité au transport des voyageurs et du fret et maintenir des corridors stratégiques nécessaires pour répondre aux besoins de base et permettre une évacuation en temps de crise. Comme le souligne le Transportation Research Board (TRB) en référence au contexte des États-Unis, « les impacts varieront en fonction des modes de transport et des régions du pays ; répandus et coûteux en termes humains et économiques, ils imposeront toutefois des changements significatifs dans la planification, la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance des systèmes de transports » (2008:4). Ce bilan peut incontestablement s'appliquer également au cas français.

L'une des principales difficultés de l'adaptation au changement climatique tient à l'incertitude quant aux impacts que ce changement provoquera au niveau local et régional. En effet, en dépit des estimations réalisées, il est extrêmement difficile de quantifier les incidences économiques réelles d'une évolution des conditions climatiques. Cette incertitude rend extrêmement complexe une normalisation des mesures d'adaptation et exige un certain degré de flexibilité afin de s'adapter à des conditions futures qui restent pour l'heure imprévisibles. Pourtant, une telle incertitude ne devrait pas constituer une source de paralysie pour l'adoption d'actions d'adaptation. En clair, les mesures de protection et les nouveaux systèmes devraient être conçus puis mis en œuvre de telle sorte que des modifications futures soient, le cas échéant, possibles.

A. Mesures d'adaptation

Comme résumé par Mansanet *et al.* (2008), plusieurs typologies ont été développées en vue d'établir une classification des stratégies d'adaptation. Pour l'OCDE (2008) et Tol (2005), il est possible d'établir une distinction notamment entre adaptation *anticipatrice* et *réactive*, adaptation *locale* et *régionale*, adaptation *à court terme* et *à long terme*, et adaptation *autonome* et *planifiée*. Parmi tous ces cas de figures, les mesures d'adaptation devront adopter deux formes majeures : premièrement, des actions liées à la planification et à la construction de nouvelles infrastructures ; deuxièmement, des actions de réhabilitation et de protection des infrastructures existantes contre les risques d'impacts climatiques (*climate proofing*).

Ces deux approches devront être complétées par des politiques de gestion de la demande en vue d'apporter une réponse à la contrainte générale du réseau. Si les réponses doivent être ajustées aux contextes spécifiques locaux, les grandes lignes de ce type de mesures et les modifications de procédures de planification qui s'y rattachent sont explicitées ci-dessous. Ces approches ne sont pas exclusives aux infrastructures de transport et peuvent être appliquées à d'autres secteurs.

Modification des procédures de planification et des critères techniques

L'intégration de considérations relatives à l'adaptation et à la mitigation lors de l'établissement des normes et de la prise de décisions constitue l'une des étapes les plus critiques pour l'adaptation des infrastructures. Concrètement, cela passe par un examen des analyses coût-bénéfice sous-jacentes à un choix d'infrastructure et par une modification des normes et des critères techniques en vue de répondre au mieux aux prévisions des futures conditions climatiques. Cette évolution et cette modification de la planification et des critères techniques pourraient avoir une incidence sur l'étendue et le financement de futurs projets, encourageront le développement de modèles mieux adaptés au climat, ainsi que des ajustements dans les techniques et matériaux de construction utilisés pour répondre au plus près aux exigences imposées par des conditions climatiques extrêmes et changeantes. De nouvelles recherches seront néanmoins nécessaires pour comprendre plus précisément la mode actuel d'établissement et de mise en œuvre de ces critères et normes en vue d'identifier les acteurs et institutions concernés.

Réhabilitation et protection des infrastructures existantes

Du fait de la durée de vie étendue de la plupart des infrastructures de transport, il est absolument capital d'identifier et de mettre en œuvre des mesures efficaces de réhabilitation des composants du réseau existant en vue de les adapter à des conditions climatiques extrêmes. La réhabilitation peut également imposer la construction d'éléments de protection contre les inondations, par exemple, et entraîner une réorganisation des pratiques et des approches opérationnelles actuelles. Si les exemples de réhabilitation d'infrastructures de transport au changement climatique sont rares, ils constituent toujours un processus coûteux. La réhabilitation récente de ponts en Californie, visant à respecter les nouvelles normes sismiques, a entraîné un investissement de plus de 8 milliards de dollars (Karhl & Roland-Holst, 2008). Bien que de nature différente, une telle intervention démontre néanmoins l'importance du coût économique d'une adaptation des structures existantes.

Une partie de ce processus imposera l'identification de « noeuds » critiques au sein du réseau ainsi que l'établissement de priorités en vue d'une intervention ou d'un renforcement immédiat. Dans bien des cas, assurer la solidité de ces points nodaux peut nécessiter la construction de systèmes redondants qui seront utilisés en cas de défaillance. De fait, la réhabilitation d'infrastructures existantes ainsi que la conception et la construction de nouvelles infrastructures coïncideront avec la nécessité de développer des systèmes redondants servant de protection aux points critiques des réseaux de transport. Cela pourra s'avérer difficile puisque le développement de nouvelles infrastructures impose bien souvent des investissements substantiels qui, lorsqu'ils sont consacrés à la création des systèmes redondants requis, pourront être jugés superflus en période de réductions ou de compressions budgétaires.

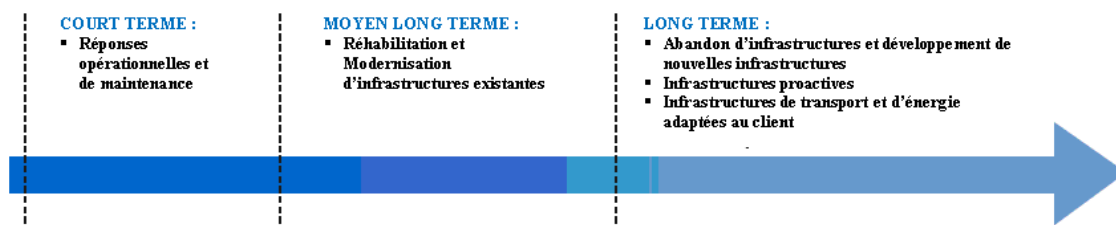
Prise en compte de la gestion de la demande

Souvent associées aux stratégies de mitigation, principalement en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les politiques de gestion de la demande doivent être considérées dans le cadre d'une stratégie d'adaptation cohérente. Tout d'abord, il est important de tenir compte de la cohérence entre stratégies d'adaptation et stratégies de mitigation. Ensuite, la réduction des contraintes qui pèsent sur les infrastructures peut contribuer à limiter les effets d'interruptions potentielles, réduisant ainsi la tension qui pèse sur l'ensemble du réseau.

La Figure 8 propose un cadre temporel pour la mise en œuvre d'actions d'adaptation.

À court terme, les réponses d'exploitation et de maintenance seront indispensables pour assurer le bon fonctionnement des infrastructures existantes dans des conditions climatiques changeantes. À moyen et long terme, un processus de réhabilitation et de modernisation des infrastructures existantes est prévu, fixant les conditions d'intervention à long terme et prévoyant l'abandon de structures existantes et le développement de nouvelles infrastructures de protection ou adaptées au climat.

Figure 8 – Chronologie des actions



Source: Mission Climat de la Caisse des Dépôts

Il peut également s'avérer nécessaire d'adapter et/ou de créer des plans de gestion de crise, y compris des modes de remplacement, des itinéraires de délestage (« itinéraires bis ») et des interruptions temporaires de réseau, en prévision d'une augmentation potentielle de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes. Le développement de ces « scénarios de crise » pour plusieurs corridors de transports importants (région parisienne et vallée du Rhône) aurait pour intérêt de contribuer à répondre peu à peu aux problématiques énergétiques en jeu et à évaluer la capacité de résistance des infrastructures.

B. Importance des acteurs et limites de l'action de cohésion

Dans le cadre des études menées par Mehrotra *et al.* (2009) sur la compréhension du risque climatique, l'évaluation des compétences et de la volonté des institutions et des acteurs d'un secteur donné constitue un élément clé pour mesurer la capacité d'adaptation de ce secteur. Le Tableau 11 présente un ensemble d'acteurs engagés dans le développement et l'exploitation des infrastructures de transport. La configuration spécifique des acteurs peut varier de façon significative d'un pays à l'autre en fonction, notamment, du poids respectif des acteurs publics et privés engagés. Il est néanmoins essentiel de tenir compte des éléments suivants : (i) variété des acteurs ; (ii) accès des acteurs aux ressources (techniques et financières) ; (iii) distribution des impacts et coûts de l'adaptation ; (iv) communication entre groupes d'acteurs pour mieux comprendre le potentiel d'adaptation et les mesures d'incitation en la matière.

En France, le secteur des transports implique toute une série de parties prenantes, non seulement dans le domaine de la construction, du financement et de l'exploitation des infrastructures, mais aussi dans leur utilisation au quotidien. De la même façon, au sein de chacune de ces catégories, la part de marché et la responsabilité des différents acteurs sont extrêmement variables, allant de plusieurs entreprises concurrentes à un seul acteur national ou international responsable des différentes fonctions.¹⁹ En tant que telles, les actions de coordination entre les différents acteurs et fonctions peuvent s'avérer des plus complexes.

¹⁹ Il convient néanmoins de noter que la fourniture et l'exploitation d'infrastructures se traduisent généralement par des tendances monopolistiques ou oligopolistiques, du fait des lourds investissements requis et des exigences en termes d'économies d'échelle.

Tableau 11 – Acteurs engagés dans la construction, l'exploitation et la maintenance des infrastructures de transport

Fonction	Acteurs*
Financement	Institutions financières, agences gouvernementales, fonds de financement
Construction	Autorités publiques, sociétés de construction, cabinets de conseil, entreprises de planification, agences de régulation
Maintenance	Opérateurs, sous-traitants
Exploitation	Autorités portuaires, opérateurs des transports publics, entreprises de services de transport spécialisés (lignes aériennes, lignes ferroviaires)

* Les acteurs ne sont pas désignés ici en tant qu'entités publiques ou privées, étant donné que les deux coexistent généralement.

Source : Mission Climat of Caisse des Dépôts

Outre les acteurs présentés dans le Tableau 11, les usagers des différentes infrastructures de transport constituent un ensemble d'acteurs d'importance comparable ; cet ensemble traverse toutes les strates économiques et sociales d'un pays (même si l'accès aux différents modes de transports est loin d'être homogène). Étant donnée la nécessité de bien-être des usagers et de bon fonctionnement général de l'économie et de la société, les infrastructures de transports prennent souvent la dimension d'un bien public. Reiken *et al.* notent que « du fait du caractère de bien public que revêtent souvent les infrastructures de transport, les mesures destinées à inciter les acteurs disposant des moyens d'adapter ces systèmes au changement climatique s'avèrent insuffisantes pour qu'ils puissent justifier les coûts d'adaptation correspondants auprès d'autres acteurs directement ou indirectement affectés par des impacts entraînant une interruption des transports » (2009:2). Pour Reiken *et al.*, cela traduit le rôle clé que jouent les pouvoirs publics et la société civile pour garantir aux infrastructures de transports la capacité de répondre aux besoins d'accessibilité dans le cadre du changement climatique.

Limites

Comme Reiken *et al.* l'ont analysé dans leur article de 2009, les relations entre acteurs sont souvent une source de limitation de la capacité d'adaptation. Du fait de la complexité des réseaux d'acteurs engagés, il existe de nombreuses barrières à franchir. Tout d'abord, il s'avère souvent difficile de démêler les dangers, les impacts et les responsabilités de façon à définir clairement les problématiques et les actions d'adaptation. Ensuite, la complexité des dépendances, des responsabilités et des externalisations a bien souvent un effet démotivant, y compris lorsque l'on dispose du savoir probant d'experts. Ainsi, même à la lumière d'une preuve convaincante, les routines et les habitudes établies de longue date sont susceptibles d'empêcher la prise en compte d'une évolution et d'une prévision des conditions environnementales au sein des processus techniques et prises de décisions (Reiken *et al.*, 2009:16).

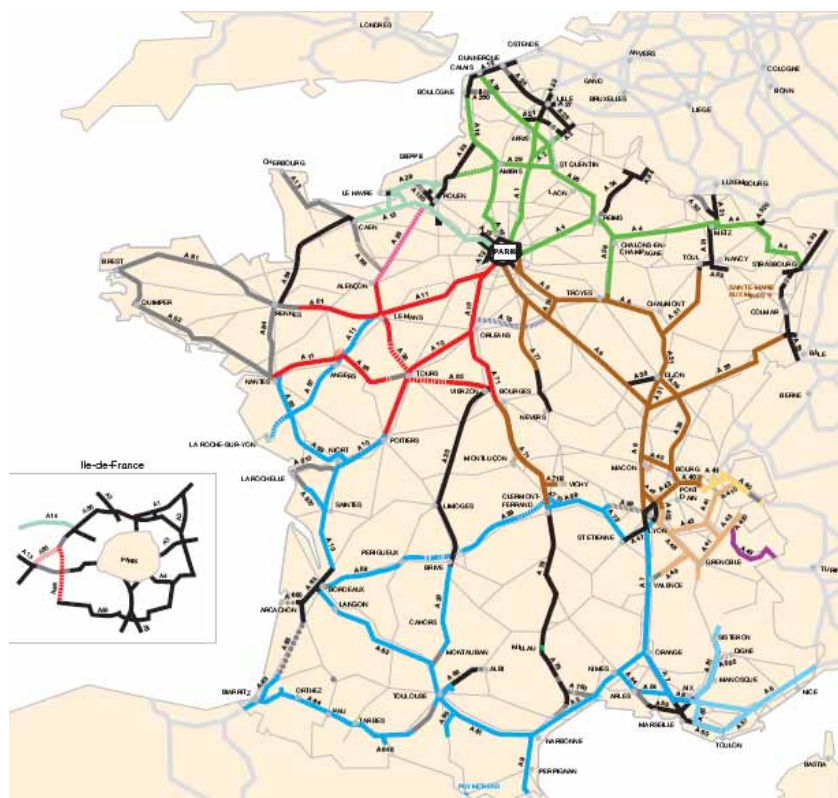
Plusieurs difficultés sont induites de la nécessité de concertation d'un large éventail d'acteurs en vue d'une adaptation proactive au changement climatique. En effet, dans bien des cas, les coûts et bénéfices ne sont pas distribués de façon égale. À l'instar des actions de mitigation, les mesures d'adaptation peuvent impliquer des coûts réels pour des acteurs ou des groupes d'acteurs avec un avantage pour le bien public. Il peut être difficile pour certains acteurs de mettre en œuvre des mesures d'adaptation *proactives* et *autonomes* sans qu'ils bénéficient d'une certaine forme d'incitation (positive ou négative) de la part des autorités locales et nationales. Comme nous le décrivons ci-dessous pour le réseau autoroutier, cela peut s'avérer particulièrement vrai dans le secteur des transports, où l'attribution de concessions, même à long terme, ne peut pas induire une action proactive des opérateurs. Cet engagement de certains acteurs des secteurs public et privé dans d'éventuelles actions d'adaptation peut poser des difficultés en termes de risques moraux (indemnisations, assureurs en dernier ressort). À cet égard, il est important qu'une attention particulière soit accordée à l'identification de mesures d'*adaptation sans regret* décrites par Hallegatte (2008) ainsi qu'à d'autres approches visant à garantir des avantages équitables dans le but d'encourager l'action de tous les acteurs concernés.

C. Impacts des stratégies de concession et d'investissement privé

En France, au cours des dernières années, la tendance pour les infrastructures de transport national est à l'attribution de concessions à des opérateurs privés. Celle-ci a montré la complexité grandissante du cadre réglementaire et de gestion dans lequel ces réseaux sont exploités. Cette attribution de concessions pour la construction, la maintenance et l'exploitation de certaines routes a connu une longue histoire et concerne principalement des entreprises d'économie mixte. Toutefois, les révisions apportées au système de concessions autoroutières à la fin des années 1990, conformément aux directives de l'UE, ont augmenté la part des entreprises entièrement privées et transféré l'entière responsabilité des infrastructures et de l'exploitation autoroutières à ces entreprises pour la durée de la concession. Dans le cadre de ce processus, l'État n'est plus le garant en dernier ressort et n'assumera pas les dettes accumulées par les opérateurs à la fin de leur contrat. En outre, en 2006, l'État français a commencé à céder ses parts dans certaines entreprises mixtes. Actuellement, près de 15 opérateurs différents, en majorité privés, sont engagés dans l'administration des autoroutes.

Ces différentes entreprises sont responsables de l'exploitation et de la maintenance des autoroutes ainsi que des investissements requis, en vertu de contrats dont la durée varie entre 50 et 70 ans (pour ceux établis après 2001). Du fait de la durée et de la structure des engagements contractuels, il revient aux opérateurs actuels de supporter les coûts d'investissements nécessaires pour assurer les efforts d'adaptation au changement climatique. Alors que des modifications dans les normes techniques fixées par les organismes réglementaires nationaux peuvent influencer notamment la résilience des chaussées nouvellement construites, les opérateurs privés peuvent ne pas être incités à réhabiliter les structures existantes, en tablant sur le fait que l'essentiel des impacts (et leurs coûts respectifs) interviendront après la fin de leur contrat. Si les contrats de concession sont conclus à long terme, des obligations à court terme entre l'État et les opérateurs sont renégociées tous les 5 ans dans le cadre d'un contrat de plan. Ce contrat de plan établit les obligations d'investissements, les tarifs usagers, les aspects commerciaux, la qualité de service et les différents aspects environnementaux, et peut être utilisé pour imposer aux opérateurs des actions d'adaptation.

Figure 9 – Réseau des sociétés concessionnaires d'autoroutes en France *



*Chaque couleur représente un opérateur public ou privé distinct. Les routes gérées toujours par l'Etat sont en noir.

Source : MEEDDAT (2005).

Néanmoins, comme l'ont montré les Figure 3 et Figure 7, il est probable que l'impact du changement climatique sur le réseau d'autoroutes variera en fonction des régions, et donc des concessionnaires. Ainsi, les entreprises opérant à différents endroits établiront des types de réponses différenciés, entraînant souvent des coûts importants mais mal repartis. Une telle configuration des impacts et du risque peut aller à l'encontre d'un modèle d'entreprise privé basé sur l'actionnariat : une entreprise donnée serait désavantagée par rapport à ses concurrentes dans le cas où le niveau d'investissement requis pour l'adaptation des infrastructures deviendrait supérieur à celui d'autres entreprises opérant dans des zones géographiques où les coûts liés à l'adaptation seraient potentiellement plus faibles.

De plus, étant donné que les revenus générés par le système de route à péage devraient être réduits dans les années à venir du fait du transfert des usagers vers d'autres modes de transport (ferroviaire et aérien),²⁰ de nouvelles recherches sont nécessaires afin de comprendre comment ces variations et ces besoins de planification de l'adaptation pourraient être inclus dans des contrats à court et à long terme dans un contexte de baisse des budgets opérationnels.

CONCLUSIONS

L'objectif du présent rapport était de combler ce que nous avons identifié comme une lacune dans la littérature spécialisée concernant les impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures de transport en France. Les infrastructures de transport jouent un rôle clé dans le développement économique et social de l'Hexagone, elles représentent une part importante des investissements et sont gérées par de multiples acteurs agissant à différents niveaux de l'État.

L'analyse graphique des impacts potentiels du changement climatique en termes d'évolution des moyennes et des extrêmes de températures et de précipitations sur le territoire français métropolitain permet d'identifier la localisation et l'étendue potentielles des impacts. Conjugée à une analyse et à une description des impacts physiques et opérationnels de chaque mode de transport, cette étude démontre que plusieurs infrastructures sont potentiellement soumises à un risque et que des analyses plus poussées s'imposent concernant la vétusté, les normes de construction et le contexte géographique des infrastructures. Elle montre également qu'en dépit de l'incertitude qui pèse actuellement sur la tendance des phénomènes climatiques extrêmes, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, des inondations et des événements caniculaires s'avèrera coûteuse et constituera une source de perturbations. Enfin, l'évolution des moyennes climatiques pourrait également conduire à des modifications dans la demande des infrastructures de transports, du fait de mutations en matière de flux touristiques, de peuplement et de production agricole.

Les mesures d'adaptation visent principalement l'évolution des procédures de planification et des critères techniques afin de mieux préparer les nouvelles infrastructures au changement climatique ainsi que la réhabilitation et, dans certains cas, la protection des infrastructures existantes. La réussite de ces efforts dépendra de la capacité d'un certain nombre d'acteurs engagés dans la conception, la construction, la maintenance et l'exploitation des infrastructures de transport à développer et à mettre en œuvre des approches cohérentes.

Les effets de l'attribution de concessions et la privatisation des infrastructures dans le cas du réseau français d'autoroutes ne sont pas jugés négatifs. Toutefois, des recherches approfondies sont nécessaires pour comprendre plus précisément dans quelle mesure un modèle d'entreprise privé basé sur l'actionnariat acceptera les coûts supplémentaires qu'imposent les mesures d'adaptation pour l'exploitation des infrastructures de transport dans certaines régions.

²⁰ Même si le mode routier reste dominant, la part modale de transport ferroviaire domestique de voyageurs n'a pas cessé d'augmenter depuis les années 1990. Dans le même temps, la part modale du transport routier de voyageurs a plafonné : en 2008, elle a diminué de 1,5% alors que le ferroviaire a augmenté de 6,0%. MEEDDAT (2009).

Du fait du manque de données, il n'y a pas été possible d'analyser pleinement les multiples variables liées aux dangers et à la vulnérabilité des infrastructures ainsi que la capacité d'adaptation des différents acteurs concernés.

Toutefois, un programme de recherche pourrait être dressé en se concentrant sur une modélisation améliorée et sur une participation accrue des acteurs publics et privés dans les domaines suivants :

- Dangers – Une modélisation plus précise s'impose en vue de mieux comprendre les impacts à petite échelle et les coûts afférents, pour des types d'infrastructures données, en particulier dans les zones urbaines caractérisées par une vulnérabilité accrue.
- Vulnérabilité – Il convient d'analyser, pour certaines infrastructures spécifiques, la prédisposition aux inondations (proximité aux côtes et cours d'eau), l'emplacement, le niveau du terrain, la densité de population, les données socio-économiques et la qualité des infrastructures, notamment leur date et méthode de construction, leur durée de vie et leur état actuel.
- Capacité d'adaptation – En travaillant avec les acteurs directement impliqués dans la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance des infrastructures, il est important d'évaluer le niveau de préparation et les ressources et informations disponibles pour mener une action coordonnée.
- Concession – Au vu de la fréquence et de l'importance croissante de la concession à des opérateurs privés ou semi-publics de la construction, de la maintenance et de l'exploitation des infrastructures, des recherches plus approfondies sont nécessaires sur ce type de contrat et sur le potentiel d'intégration de plans et d'actions d'adaptation.
- Financement – De nouvelles recherches sont nécessaires sur les instruments économiques disponibles pour assister et fournir des incitations adaptées aux différents acteurs engagés dans le financement des projets d'adaptation.

De plus, comme le relève dans une grande partie de la littérature, les variations probables du niveau de la mer impacteront toutes les formes d'infrastructure situées dans les régions côtières. Le sujet n'a pas pu être abordé ici en raison du manque de données (notamment les relevés d'altitude).

Le présent rapport constitue une première étape, il souligne et identifie la nécessité de recherches supplémentaires ainsi que les besoins d'actions de la part des experts, responsables officiels et divers acteurs concernés. Si les graphiques présentés dans ce rapport ne sont pas en mesure de prévoir précisément les impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures de transport, ils peuvent néanmoins servir à identifier les problématiques clés et à attirer l'attention sur les actions essentielles à mettre en œuvre pour limiter ces impacts sur l'économie, la société et l'environnement.

ANNEXE 1 : BILAN DE LA LITTÉRATURE INTERNATIONALE

Le corpus de recherches le plus important a été établi aux États-Unis, notamment par le « Rapport spécial sur les impacts potentiels du changement climatique sur les transports aux États-Unis » (*Special report on the potential impacts of climate change on U.S. Transportation*) (2008) réalisé par l'Office de recherche sur les transports (Transport Research Board, TRB) du Conseil national de recherche américain des académies nationales (US National Research Council of the National Academies) ainsi que par l'« Évaluation des impacts sur les infrastructures de transport dans la région côtière du Golfe du Mexique » (*Assessment of the impacts on transportation infrastructure in the Gulf Coast region*) du Programme scientifique sur le changement climatique des États-Unis (U.S. Climate Change Sciences Program, USCCSP). Ces deux rapports ont reconnu l'importance et le coût potentiellement élevé du changement climatique sur les infrastructures de transport aux États-Unis. Le TRB a montré que l'inondation des routes, des voies ferrées, des systèmes de transports et des pistes d'aéroport situés sur les zones côtières, du fait de l'élévation générale du niveau de la mer, constituait l'impact potentiel le plus important pour le système de transport nord-américain (2008). Par ailleurs, les deux rapports soulignent que l'augmentation des extrêmes climatiques, y compris les phénomènes de canicule, de précipitations intenses, d'ouragans, de sécheresses et d'élévation du niveau de la mer, ainsi que des marées de tempêtes et des affaissements de terrains, constituent, à des degrés divers, des risques significatifs pour divers régions et modes de transports (TRB, 2008, USCCSP, 2008). L'« Étude préliminaire sur les impacts du changement climatique au niveau sectoriel » (*Preliminary study of climate change impacts across sectors*) réalisée par le gouvernement canadien confirme le résultat des autres rapports, mais montre également que l'adoucissement du climat en hiver au Canada comporte à la fois des risques pour le pays (instabilité du terrain provoquée par la fonte du permafrost) mais aussi des bénéfices potentiels (baisse des coûts de maintenance des routes en hiver) (Ressources naturelles Canada, 2008).

Concernant les études relatives aux impacts pesant sur des régions spécifiques, l'étude préliminaire de l'USCCSP sur la région côtière du Golfe du Mexique identifie plusieurs impacts potentiels, en soulignant l'évolution du schéma de répartition des précipitations, qui entraîne à court terme des phénomènes d'inondation, une élévation du niveau de la mer inondant les infrastructures existantes, et une intensification des tempêtes conduisant à des interruptions de service plus fréquentes et à des dommages accrus sur les infrastructures (2008:ES7-8). L'évaluation des impacts potentiels qu'a menée le gouvernement de l'État de Victoria, en Australie, est parvenue à des conclusions similaires, en mettant l'accent sur les risques accrus d'inondation provoqués par une hausse de la fréquence des épisodes de vents violents ainsi que sur l'accélération de la dégradation des matériels et des structures (2007). Avec un réseau routier évalué à lui seul à 32 milliards de dollars australiens, l'État de Victoria a reconnu que l'impact du changement climatique pourrait représenter un lourd poids financier sur les opérateurs et les propriétaires, y compris les conseils municipaux, le gouvernement de l'État et les acteurs privés. L'idée forte qui ressort de l'essentiel de la littérature est que le changement climatique pourrait réduire de façon significative la durée de vie de la plupart des infrastructures de transport et en accroître les coûts de maintenance et de remplacement.

La littérature indique que les impacts sur les infrastructures de transport situées en zones urbaines seront comparables à ceux mis en avant par les études portant sur l'impact mondial du changement climatique. Toutefois, du fait de la plus forte concentration et densité d'infrastructures de transport en zones urbaines, les impacts ponctuels au sein des villes pourraient entraîner des dommages bien supérieurs. La littérature note également que les impacts liés à la température dans les villes pourraient se trouver exacerbés par les effets d'îlots de chaleur urbaine, augmentant le niveau de température moyen au-delà des normes régionales (Atkins, 2006). Dans le cadre d'une analyse relative aux impacts du changement climatique sur les réseaux de transports de la ville de Londres (LCCP, 2005; Atkins, 2006), les scénarios climatiques montrent que la capitale britannique peut tabler sur des hivers plus humides et plus doux, des averses plus intenses, des étés plus chauds et plus secs, caractérisés par des valeurs de température extrêmes plus fréquentes, et une élévation du niveau de la mer, avec un risque accru de raz-de-marée.

À cet égard, la ville de Londres prévoit une augmentation des phénomènes d'inondation de son métro, des infrastructures routières et ferroviaires, y compris la fermeture prolongée de stations de métro, des dommages sur les infrastructures routières et ferroviaires nationales desservant la zone urbaine et des incidences sur la santé des voyageurs empruntant le système de transport public (LCCP, 2005).

Des études comparables, menées dans la zone métropolitaine de Boston, (Suarez *et al.*, 2005), dans la région de New York (Zimmerman, 1999; TRB, 2008:92-96) et dans la région de Seattle et du Puget Sound (TRB, 2008 :98-100) aux États-Unis présentent des résultats similaires, y compris une vulnérabilité accrue des infrastructures routières et des ponts qui se trouvent bien souvent dans de piètres conditions ; c'est le cas de près de 30 % des 105 ponts que compte actuellement Seattle. Il convient de noter que, dans bien des cas, les coûts liés aux impacts du changement climatique reposent sur les propriétaires de ces infrastructures, à savoir les municipalités elles-mêmes et sur un nombre croissant d'acteurs privés qui, dans bien des cas, se trouvent confrontés à des situations financières difficiles pour faire face à l'arriéré des réparations d'infrastructures nécessaires. (TRB, 2008; Karhl & Roland-Holst, 2008; Gouvernement de Victoria, 2007). S'ils ne sont pas pris en compte, les impacts du changement climatique ne serviront qu'à exacerber les charges financières qui pèsent sur les municipalités.

Les impacts du changement climatique sur les infrastructures de transport ont fait l'objet d'une attention moindre de la part des Européens, même si quelques exemples méritent d'être cités. Le Programme du Royaume-Uni sur l'impact du changement climatique (UK Climate Impact Programme, 2009) a inclus le transport dans le cadre de ses sujets d'étude, et les transports ont été intégrés à l'analyse régionale réalisée dans l'ensemble du Royaume-Uni. Il n'existe toutefois aucune étude d'envergure ni d'évaluation des coûts liés à ces impacts potentiels. Les Pays-Bas ont intégré une partie de cette analyse dans le cadre de leur communication nationale à la CCNUCC, mais l'auteur n'a identifié aucune étude d'ensemble (Ministère néerlandais du Logement, de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, 2001). Jusqu'ici, la littérature relative à l'impact du changement climatique sur les infrastructures de transport a été très limitée en France. À l'exception de quelques mentions dans des articles concernant principalement la mitigation au sein du secteur des transports (Bureau, 2008; Gastaud, 2006), seul un projet de rapport d'étape interministériel de 2008 décrit les impacts potentiels en France (ONERC, D4E & EcoFys, 2008). Alors que le rapport initial fournit des informations générales sur les impacts potentiels, aucune analyse systématique ni aspect quantitative n'a été présentée. La publication de la version finale de ce rapport est prévue pour la mi-2009.

ANNEXE 2 : TABLEAU DES IMPACTS PHYSIQUES ET OPERATIONNELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

Mode de transport	Risques physiques	Variable climatique	Impacts opérationnels		
Transport terrestre	Routes	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation de l'asphalte (ornières, déformations) 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du rayonnement solaire Augmentation de la température et canicule Augmentation des cycles gel/dégel (hivers doux) 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution des vitesses d'exploitation Augmentation de la maintenance Limitation des périodes de construction Surchauffe des véhicules et détérioration des pneus Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations 	
		<ul style="list-style-type: none"> Dégradation des fondations routières 	<ul style="list-style-type: none"> Variation accrue des périodes humides/sèches Diminution de l'humidité disponible Élévation du niveau de la mer 		
		<ul style="list-style-type: none"> Inondations des routes 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations extrêmes journalières Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes Élévation du niveau de la mer 		
		<ul style="list-style-type: none"> Dommages incendies sur l'infrastructure routière 	<ul style="list-style-type: none"> Variation accrue des périodes humides/sèches Diminution de l'humidité disponible 		<ul style="list-style-type: none"> Visibilité réduite
		<ul style="list-style-type: none"> Changements dans l'aménagement et la végétation des bords de routes 	<ul style="list-style-type: none"> Évolution des précipitations Évolution des températures 		
		<ul style="list-style-type: none"> Surcharge des systèmes de drainage 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations extrêmes journalières Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes 		
	Rail	<ul style="list-style-type: none"> Mouvement des rails 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la température et canicule Diminution de l'humidité disponible 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution des vitesses d'exploitation Diminution de la charge payante Augmentation du suivi de la température des rails Augmentation de la maintenance 	
		<ul style="list-style-type: none"> Dommages incendies sur les rails (y compris les caténaires) 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations extrêmes journalières Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes Augmentation de l'activité de tempêtes électriques 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations 	
		<ul style="list-style-type: none"> Dommages incendies sur les rails 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la variation des périodes humides/sèches Diminution de l'humidité disponible 		

*Etude Climat n°18 - Infrastructures de transport en France :
vulnérabilité au changement climatique et possibilités d'adaptation*

	Ponts	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation de la structure du pont 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la température et canicule Augmentation du rayonnement solaire 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du suivi des structures Augmentation de la maintenance
		<ul style="list-style-type: none"> Dommages provoqués par des tempêtes 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations extrêmes journalières Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes Augmentation de l'intensité des vents extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations
	Tunnels	<ul style="list-style-type: none"> Inondation 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des précipitations extrêmes journalières Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes Élévation du niveau de la mer 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du suivi des structures Augmentation de la maintenance Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations
Transport par voies d'eau	Ports	<ul style="list-style-type: none"> Impacts des tempêtes sur les infrastructures portuaires et côtières 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de l'intensité des vents extrêmes Élévation du niveau de la mer Augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes Augmentation des précipitations extrêmes journalières 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du suivi des structures Augmentation de la maintenance
		<ul style="list-style-type: none"> Impacts des inondations sur les équipements portuaires et côtiers 	<ul style="list-style-type: none"> Élévation du niveau de la mer 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations
	Canaux	<ul style="list-style-type: none"> Diminution du niveau des eaux 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution des pluies Augmentation de la température et canicule 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la charge payante Conflits liés à l'allocation et au partage des ressources hydriques
<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des dépôts sédimentaires 		<ul style="list-style-type: none"> Évolution des schémas de précipitations 	<ul style="list-style-type: none"> Demandes accrues de dragage 	
<ul style="list-style-type: none"> Croissance accrue des plantes aquatiques 		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation des températures 	<ul style="list-style-type: none"> Engorgement des conduites d'approvisionnement et des égouts 	
Transport aérien	Aéroports	<ul style="list-style-type: none"> Dégradation de l'asphalte 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du rayonnement solaire Augmentation de la température et canicule 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution de la charge payante Augmentation du suivi des conditions des pistes Augmentation de la maintenance
		<ul style="list-style-type: none"> Dégradation des fondations des pistes 	<ul style="list-style-type: none"> Variation accrue des périodes humides/sèches Diminution de l'humidité disponible 	
		<ul style="list-style-type: none"> Dommages provoqués par des tempêtes 	<ul style="list-style-type: none"> Élévation du niveau de la mer Augmentation des précipitations extrêmes journalières Augmentation de la fréquence des tempêtes 	<ul style="list-style-type: none"> Réduction de la durée d'exploitation liée aux inondations Augmentation de la consommation d'énergie des opérations au sol
		<ul style="list-style-type: none"> Perte d'efficacité moteur 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation de la température et canicule 	

Source : Mission Climat de la Caisse des Dépôts, après CSIRO 2007, Ressources naturelles Canada 2008, USCCS 2008, TSB 2008.

BIBLIOGRAPHIE

- Atkins, 2006. *The impacts of climate change on London's transport system*. Presentation to the CIWEM Met Branch Conference, 22 February.
- Boe, J., 2007. *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*. Thesis, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- Bureau, Dominique, 2008. *Transports et changement climatique: cadre de référence pour l'action publique*, Notes de synthèse du SESP, 170.
- Caballero, Y. and J. Noilhan, 2007. *Etude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne*, Météo-France / Agence de l'eau-Ardour Garonne.
- Climact, 2005. "Changements climatiques: quels impacts en France?" Report produced for Greenpeace. <http://www.greenpeace.org/france/presse/dossiers-documents/impactsclimatiquesenfrance>.
- Ducharne, A., 2008. *Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme (RExHySS)*, <http://www.gip-ecofor.org/publi/imprimer.php?id=122&domain=38&lang=fr_FR> Consulté le 18 juin 2009.
- Ecodecision, 2006. *Evaluation Economique des Dommages Lies aux Inondations*. Agence de l'Eau – Artois Picardie.
- Government of Victoria, 2007. *Infrastructure and climate change risk assessment for Victoria*. Report to the Victorian Government.
- Gaustad, André, 2006. *Effet de serre, Changement climatique et Politique des transports*, Groupe Interdisciplinaire de Réflexion Sur Les Traversées Sud-Alpines et l' Aménagement du Territoire Maralpin, France.
- Hallegatte S., 2008. "Adaptation to climate change: Do not count on climate scientists to do your work". Reg-Markets center, Related Publication.
- IMFREX (2007). *Rapport Final*. <http://imfrex.mediafrance.org/web/documents/downloads/rapport_final_imfrex.pdf> Consulté le 18 mai 2009.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Kahrl, Fredrich and David Roland-Holst, 2008. *California Climate Risk and Response*. Department of Agricultural and Resource Economics Research Report No. 08102801, University of California, Berkeley.
- Kinsella, Yvette and Frank McGuire, 2006. *Climate change uncertainty and the state highway network: A moving target*, Transit New Zealand.
- Koetse, Mark J. and Piet Rietveld, 2009. "The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings." *Transportation Research Part D*, 14:205-221.
- LCCP, 2005. *Climate Change and London's transport systems: Summary Report*. London climate change partnership, Mayor of London.
- LCI.fr, 2009. *Tempête - 10.000 secouristes, l'armée en renfort* <<http://tf1.lci.fr/infos/france/faits-divers/0,,4236483,00-l-heure-du-bilan-.html>> Consulté le 16 avril 2009.
- LeFigaro.fr, 2009. *Plus de 400.000 foyers toujours privés d'électricité*, <<http://www.lefigaro.fr/actualite-france/2009/01/23/01016-20090123ARTFIG00510-une-grosse-tempete-menace-le-sud-ouest-de-la-france-.php>> Consulté le 15 avril 2009.

- Létard, V., H. Flandre and S. Lepeltier, 2004. *La France et les Français face à la canicule : les leçons d'une crise*, Report °195 to the Session Ordinaire 2003-2004 of the French Senate.
- Manoha, B., F.Hendrickx, A.Dupeyrat, C.Bertier and S.Parey, 2007. Impact du Changement Climatique sur Les Activités D'EDF (Projet IMPEC), <<http://www.shf.asso.fr/29JH/Manoha-SHF-mars2007.pdf>> Consulté le 18 juin 2009.
- MEEDDAT, 2005. *Autoroutes et routes nationales – Les autoroutes concédées* <http://www.route.equipement.gouv.fr/article.php3?id_article=54> Consulté le 16 avril 2009.
- MEEDDAT, 2008. *Les comptes des transports en 2007*. 45eme Rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation. Ministère de l'Écologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, France.
- MEEDDAT, 2009, *Les comptes des transports en 2008*. Version provisoire du 46e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation. Ministère de l'Écologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, France.
- Mehrotra, Shagun, Cynthia Rosenzweig, Claudia Natenzon, Ademola Omojola, Regina Folorunsho and Joseph Gilbride, 2009. *Framework for Urban Climate Risk Assessment*, report for the 5th Urban Research Symposium, Marseille.
- Mansanet-Bataller, Maria, Morgan Hervé-Mignucci et Alexia Leseur, 2009. *Energy Infrastructures in France: Climate Change Vulnerabilities and Adaptation Possibilities*. Working Paper °1 de la Mission Climat de la Caisse des Dépôts.
- Mendelsohn R., 2006. "The Role of Markets and Governments in Helping Society Adapt to a Changing Climate", *Climatic Change* 78(1).
- Ministry of Housing, Spatial Planning, and the Environment, 2001. *Third Netherlands' National Communication on Climate Change Policies: Prepared for the Conference of the Parties under the Framework Convention on Climate Change*. Directorate Climate Change and Industry/IPC 650, Climate Change and Acidification Department, October, pages 79-80.
- NR (Natural Resources) Canada, 2008. *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective*. Climate Change Impacts and Adaptation Directorate.
- OECD 2008, "Economic Aspects of Adaptation to Climate Change. Costs, Benefits and Policy Instruments". Research Report.
- ONERC, D4E & EcoFys, 2008. *Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France*. Document d'étape, juin.
- Peterson, Thomas C., Marjorie McGuirk, Tamara G. Houston, Andrew H. Horvitz and Michael Wehner, 2006. *Climate Variability and Change with Implications for Transport*, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and Department of Energy (DOE), USA.
- Planton, Serge, Michel Déqué, Fabrice Chauvin and Laurent Terray, 2008. *Expected impacts of climate change on extreme climate events*, C.R. Geosciences, 340:564-574.
- Port du Calais, 2009. *Stie du Port du Calais : Statistiques*. <<http://www.calais-port.com/communication/statistiques/>> Consulté le 18 juin 2009.
- Port de Marseille, 2007. *Tableau Général des Trafics*. < <http://www.marseille-port.fr/resultats/mensuels/2007/decembre/decembre2007.pdf>> Consulté le 18 juin 2009.
- Reckien, Diana, Klaus Eisenack and Esther Hoffmann, 2009. *Adaption to climate change in the transport sector: the constraining effect of actor-interdependencies*. Potsdam Institute for Climate Impact Research.
- Réseau Ferré de France, 2009a. *Le réseau ferroviaire – Inventaire du réseau*. <http://www.rff.fr/pages/reseau/inventaire_reseau.asp?lg=fr> Consulté le 15 avril 2009.

- Réseau Ferré de France, 2009b. *Le réseau ferré national*, <http://www.rff.fr/biblio_pdf/rf_inv_r_carte.pdf> Consulté le 15 avril 2009.
- Suarez, Pablo, William Anderson, Vijay Mahal & T.R. Lakshamanan, 2005. "Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A systemwide performance assessment of the Boston Metro Area." *Transportation Research Part D*, 10:231-244.
- TRB, 2008. *Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation*. Transportation Research Board Special Report 290. Washington DC: Transportation Research Board.
- Tol R.S.J., 2005. "Adaptation and mitigation: trade-offs in substance and methods", *Environmental Science & Policy*, 8(6): 572-578.
- UK Climate Impacts Programme, 2009. *Transport*, <http://www.ukcip.org.uk/index.php?option=com_content&task=view&id=429&Itemid=465 > Consulté le 30 janvier 2009.
- USCCSP, 2008. *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I*. U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 4.7.
- Voies Navigables de France, 2009. *La carte des voies navigables en France*, <http://www.vnf.fr/vnf/img/cms/Tourisme_et_domainehidden/france_200807241648.pdf>, Consulté le 15 avril 2009.
- Zimmerman, Rae, 1999. "Global Climate Change and Transportation Infrastructure: Lessons from the New York Area." *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation: Workshop Summary and Proceedings*. U.S. Department of Transportation Center for Climate Change.

LA RECHERCHE DE LA MISSION CLIMAT

Etudes Climat

- N°1 **Les fonds d'investissement dans les actifs carbone : état des lieux**
ARIANE DE DOMINICIS - Janvier 2005
- N°2 **Plan National d'Allocation des Quotas et territoires**
EMMANUEL ARNAUD - Mars 2005
- N°3 **Les plateformes de marché et le fonctionnement du système de quotas CO₂**
ROMAIN FREMONT - Juin 2005
- N°4 **Les enjeux de la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le bâtiment**
EMMANUEL ARNAUD - Septembre 2005
- N°5 **Les expériences de projets domestiques CO₂ dans le monde**
ARIANE DE DOMINICIS - Septembre 2005
- N°6 **Agriculture et réduction des émissions de gaz à effet de serre**
BENOIT LEGUET - Septembre 2005
- N°7 **Fonds d'investissement dans les actifs CO₂ : l'accélération**
ARIANE DE DOMINICIS - Novembre 2005
- N°8 **Panorama des Plans nationaux d'allocation des quotas en Europe**
CLAIRE DUFOUR & ALEXIA LESEUR - Avril 2006
- N°9 **Trading in the Rain ; Précipitations et émissions du secteur électrique européen**
KATIA HOUPERT & ARIANE DE DOMINICIS - Juillet 2006
- N°10 **Croître sans réchauffer ? L'intensité carbone des économies développées**
ANAÏS DELBOSC, JAN HORST KEPPLER & ALEXIA LESEUR - Janvier 2007
- N°11 **Compenser pour mieux réduire – Le marché de la compensation volontaire**
VALENTIN BELLASSEN & BENOIT LEGUET - Septembre 2007
- N°12 **Fonds d'investissement CO₂ : l'essor des capitaux privés**
IAN THOMAS COCHRAN & BENOIT LEGUET - Octobre 2007
- N°13 **Echanges de quotas en période d'essai du marché européen du CO₂ : ce que révèle le CITL**
RAPHAËL TROTIGNON & ANAÏS DELBOSC - Juin 2008
- N°14 **Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts : quelle contribution de la part des marchés carbone ?**
VALENTIN BELLASSEN, RENAUD CRASSOUS, LAURA DIETZCH & STEPHAN SCHWARTZMAN –
Septembre 2008
- N°15 **Du changement dans l'air : les bases du futur marché américain du carbone**
CATE HIGHT & GUSTAVO SILVA-CHAVEZ - Octobre 2008
- N°16 **Développement des énergies renouvelables : quelle contribution du marché carbone ?**
CECILE BORDIER - Décembre 2008
- N°17 **Financer L'adaptation aux Changements Climatiques**
ANITA DROUET – Avril 2009

Toutes les publications de la Mission Climat sont disponibles en français sur :

<http://www.caissedesdepots.fr/missionclimat/fr>

Directeur de la Publication :

BENOIT LEGUET +33 1 58 50 98 18
benoit.leguet@caissedesdepots.fr

Conseiller scientifique :

CHRISTIAN DE PERTHUIS +33 1 58 50 22 62
christian.deperthuis@caissedesdepots.fr

Contacts Mission Climat :

EMILIE ALBEROLA +33 1 58 50 41 76
emilie.alberola@caissedesdepots.fr

MAY ARMSTRONG +33 1 58 50 76 27
may.armstrong@caissedesdepots.fr

VALENTIN BELLASSEN +33 1 58 50 19 75
valentin.bellassen@caissedesdepots.fr

MALIKA BOUMAZA +33 1 58 50 37 38
malika.boumaza@caissedesdepots.fr

IAN COCHRAN +33 1 58 50 85 17
ian.cochran@caissedesdepots.fr

MARIANA DEHEZA +33 1 58 50 99 85
mariana.deheza@caissedesdepots.fr

ANAÏS DELBOSC +33 1 58 50 99 28
anaïs.delbosc-e@caissedesdepots.fr

MORGAN HERVÉ-MIGNUCCI +33 1 58 50 99 77
morgan.herve-mignucci@caissedesdepots.fr

AUDREY HOLM +33 1 58 50 74 89
audrey.holm@caissedesdepots.fr

JESSICA LECOLAS +33 1 58 50 98 20
jessica.lecolas@caissedesdepots.fr

ALEXIA LESEUR +33 1 58 50 41 30
alexia.leseur@caissedesdepots.fr

MARIA MANSANET-BATALLER +33 1 58 50 85 22
maria.mansanet@caissedesdepots.fr

FADWA MOULOUDI +33 1 58 50 83 39
fadwa.mouloudi@caissedesdepots.fr

ANTOINE SAMZUN +33 1 58 50 98 19
antoine.samzun@caissedesdepots.fr

OLIVER SARTOR +33 1 58 50 85 20
oliver.sartor@caissedesdepots.fr

SUZANNE SHAW +33 1 58 50 76 54
suzanne.shaw@caissedesdepots.fr

BORIS SOLIER +33 1 58 50 85 18
boris.solier@caissedesdepots.fr

NICOLAS STEPHAN +33 1 58 50 98 39
nicolas.stephan@caissedesdepots.fr

RAPHAËL TROTIGNON +33 1 58 50 96 04
raphaël.trotignon@caissedesdepots.fr



Cette Etude Climat a été réalisée par la Mission Climat du département CDC Climat de la Caisse des Dépôts.

Les auteurs assument l'entière responsabilité de toute erreur ou omission.

La Mission Climat de la Caisse des Dépôts est un centre de ressources qui anime et coordonne les travaux de recherche et de développement dans le champ de l'action contre les changements climatiques.