

Adaptation au changement climatique des ports fluviaux de la région du Rhin supérieur

Guide et enseignements issus du projet CRANE



Rapport d'étude

Juin 2026

Le Cerema¹, référent public en aménagement, accompagne l'État, les collectivités et les entreprises pour adapter les territoires au changement climatique.

Il joue un rôle clé dans l'élaboration et la mise en œuvre de politiques publiques nationales et de projets territoriaux adaptés au climat de demain dans 6 domaines d'activité : aménagement et stratégies territoriales, bâtiment, mobilités, infrastructures de transport, environnement et risques, mer et littoral.

Avec des équipes multidisciplinaires et 27 implantations sur les territoires de l'Hexagone et des Outre-mer, le Cerema dispose d'une approche globale pour conseiller, innover et fédérer.

www.cerema.fr

¹ Le Cerema est un établissement public relevant des ministères chargés de l'Aménagement du territoire et de la Transition écologique

Adaptation au changement climatique des ports fluviaux de la région du Rhin supérieur

Guide et enseignements issus du projet CRANE

Commanditaire : Port Autonome de Strasbourg

Auteurs : David LUTTENAUER, Léo THOMAS

Responsables du rapport

David LUTTENAUER et Léo THOMAS – Département Territoires Mobilités et Infrastructures – Groupe Territoires et Villes en Transition

Direction Territoriale Est – Promenade du Saulcy, 57000 Metz

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
V1	16/06/2026	Version initiale

Références

N° d'affaire / NOVA : 23-ET-0466

Nom	Service	Rôle et fonction	Date et Visa
David LUTTENAUER	DTerEst/DTMI/TVT	Auteur principal et cochef de projet	
Léo THOMAS	DTerEst/DTMI/TVT	Auteur principal et cochef de projet	24/04/2026 - LT
Edouard WOLFF	DTerEst/AS/VPI	Contributeur	28/05/2026 - EW
Kamila BENSAAFI	DTerEst/AN/ERA	Contributrice	04/06/2026 - KB
Kevin SIEBERT	DTerEst/AN/OA	Contributeur	28/05/2026 - VR
Koffi KOUASSI	DTecREM/DPN/IP	Contributeur	01/06/2026 - KK
Léa GAROT	DTerEst/DTMI/TVT	Contributrice	30/06/2026 - LG
Marie GEORGES	DTerEst/DTMI/TVT	Contributrice	30/06/2026 - MG
Vincent REMY	DTerEst/AN/ERA	Contributeur	28/05/2026 - VR
Jeanne-Marie GOUIFFES	DTecREM/DPN	Relectrice	01/06/2026 - JMG
Karine DREYER	DTerEst/DTMI/TVT	Valideur : cheffe de groupe	
Jean-Luc BAUER	DTerEst/DTMI	Valideur : responsable de production	

Résumé de l'étude

Le projet CRANE (Climate Resilience and Adaptations for Upper Rhine Ports) est un projet transfrontalier, réalisé en langue française et allemande, qui a permis d'**anticiper** les effets du changement climatique et de planifier la mise en œuvre d'une **démarche d'adaptation** au sein de **sept ports fluviaux** de la région du Rhin Supérieur : Bâle, Karlsruhe, Kehl, Ludwigshafen, Mannheim, Mulhouse et Strasbourg. Ce travail a été réalisé par le biais d'un partenariat entre l'institut allemand **Fraunhofer IAIS** et le **Cerema**. Le projet a été piloté par le **Port Autonome de Strasbourg** et est co-financé à 60% par l'Union Européenne dans le cadre du programme **INTERREG Rhin Supérieur**.

Le projet a permis de **structurer la démarche d'adaptation** des ports impliqués (dans le cadre d'une démarche participative et *via* la co-construction de trajectoires d'adaptation), **d'opérationnaliser** sa mise en place, d'**enrichir la base de mesures** à disposition et de **préciser leur modalité** de mise en œuvre, tout en **sensibilisant** les différents acteurs portuaires. Ce projet a également contribué à diminuer les **incertitudes** relatives le fonctionnement des zones portuaires induites par le changement climatique. Le degré d'incertitude résiduel, impliqué par le recours à des simulations climatiques, a été **pleinement intégré dans la méthode utilisée** et est pris en compte dans les démarches d'adaptation définies avec chaque port.

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Changement climatique	Ressource en eau
Adaptation	Territoire
Trajectoire d'adaptation	Ports fluviaux
Terminaux portuaires	Voies navigables
Infrastructures	Résilience

Statut de communication de l'étude

Tous les livrables produits sur SCSP (subvention pour charge de service public) doivent être publiés en ACCÈS LIBRE.

Seules les exceptions figurant au CRPA (Code des relations entre le public et l'administration) peuvent limiter cette ouverture.

Sur la base de ces informations, il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude :

☒ **Accès libre** : document accessible au public sur internet

☐ **Accès restreint** : document accessible uniquement aux agents du Cerema

Contexte et objet de l'étude

Le projet **CRANE** (Climate Resilience and Adaptations for Upper Rhine Ports) s'inscrit dans un contexte de **changement climatique** de plus en plus prégnant impliquant la multiplication et l'intensification des événements météorologiques extrêmes. Le transport fluvial rhénan a notamment été impacté par des périodes d'**étiages** particulièrement fortes en 2018 et 2022. Ces périodes d'étiage ont mené à des interruptions de navigation entraînant de fortes perturbations des chaînes logistiques aux effets délétères pour les acteurs économiques de la région. En parallèle, les événements climatiques extrêmes (vagues de chaleur, épisodes de fortes précipitations, tempêtes, etc.) peuvent également perturber les **activités portuaires** elles-mêmes en impactant les infrastructures et les conditions de travail du personnel.

Le projet a donc pour objectif d'anticiper ces difficultés et de mettre en place une **démarche d'adaptation** au changement climatique pour garantir la **continuité des activités portuaires**. **Sept ports fluviaux** de la région du Rhin Supérieur sont impliqués : Bâle, Karlsruhe, Kehl, Ludwigshafen, Mannheim, Mulhouse et Strasbourg. Le projet a été piloté par le **Port Autonome de Strasbourg** et a été réalisé par le biais d'un travail partenarial entre l'institut allemand **Fraunhofer IAIS** et le **Cerema**. Celui-ci est également co-financé à 60% par l'Union Européenne dans le cadre du programme **INTERREG Rhin Supérieur**.

SOMMAIRE

Introduction.....	7
1 Methodologie du projet CRANE	8
1.1 Identification et analyse des risques climatiques.....	8
1.2 Adaptation des ports au changement climatique	10
1.2.1 L'identification de mesures d'adaptation	10
1.2.2 La co-construction de trajectoires d'adaptation	11
1.2.3 Conclusion sur la méthode utilisée.....	13
2 Principaux enseignements du projet.....	14
2.1 Terminaux portuaires	14
2.1.1 Transbordement : Accueil et stabilité des bateaux à quai.....	14
2.1.2 Transbordement : Grues et engins de manutention	16
2.1.3 Stockage : Terminaux à conteneurs, entrepôts couverts et à ciel ouvert.....	18
2.1.4 Conclusion sur les terminaux portuaires	20
2.2 Infrastructures	20
2.2.1 Infrastructures fluviales	20
2.2.2 Infrastructures ferroviaires	22
2.2.3 Infrastructures routières	25
2.2.4 Conclusion sur les infrastructures	26
2.3 Ressource en eau	27
2.3.1 Étiages et baisse des niveaux d'eau du Rhin	27
2.3.2 Inondations et fortes précipitations.....	28
2.3.3 Sécheresse — Consommation d'eau des entreprises portuaires	31
2.3.4 Conclusions sur la ressource en eau	32
2.4 Intégration des ports au sein de leur territoire	32
3 Conclusion.....	34
4 Annexes	35
4.1 Bibliographie.....	35
4.1.1 Méthodologie	35
4.1.2 Terminaux.....	35
4.1.3 Infrastructures.....	36
4.1.4 Ressources en eau	37
4.1.5 Territoire	38

INTRODUCTION

Ce document est un guide destiné à restituer les principaux enseignements du projet CRANE (Climate Resilience and Adaptations for Upper Rhine Ports) et à proposer des pistes d'adaptation au changement climatique pour les ports fluviaux de la région du Rhin supérieur.

Le projet **CRANE** s'inscrit dans un contexte de changement climatique de plus en plus prégnant impliquant la multiplication et l'intensification des événements météorologiques extrêmes. Ce contexte entraîne des perturbations des **chaînes logistiques** auxquelles les ports fluviaux et les voies navigables n'échappent pas. Les phénomènes climatiques extrêmes (vagues de chaleur, épisodes de fortes précipitations, tempêtes, etc.) peuvent, en effet, perturber directement les **activités portuaires** en impactant les infrastructures et les conditions de travail du personnel. Par ailleurs, les **conditions de navigation** sur le Rhin peuvent également être dégradées. En cas d'épisodes d'inondation intense, la navigation est interrompue. De même, les périodes d'étiages particulièrement fortes limitent les taux de chargement des bateaux et peuvent mener à des interruptions de navigation. Le changement climatique représente donc un défi pour les ports fluviaux mais des **solutions d'adaptation existent**. Le projet CRANE a pour objectif d'anticiper ces difficultés et de mettre en place une **démarche d'adaptation** au changement climatique pour garantir la **continuité des activités portuaires**.

Sur le plan méthodologique, le diagnostic des vulnérabilités et des risques climatiques a été conduit en s'appuyant notamment sur les échanges organisés lors d'ateliers participatifs réunissant les sept ports impliqués. Les préconisations d'adaptation ont, quant à elles, été formulées à dire d'expert, sur la base des travaux de benchmark, des entretiens conduits avec des acteurs du transport fluvial et de l'expertise pluridisciplinaire mobilisée au sein du Cerema.

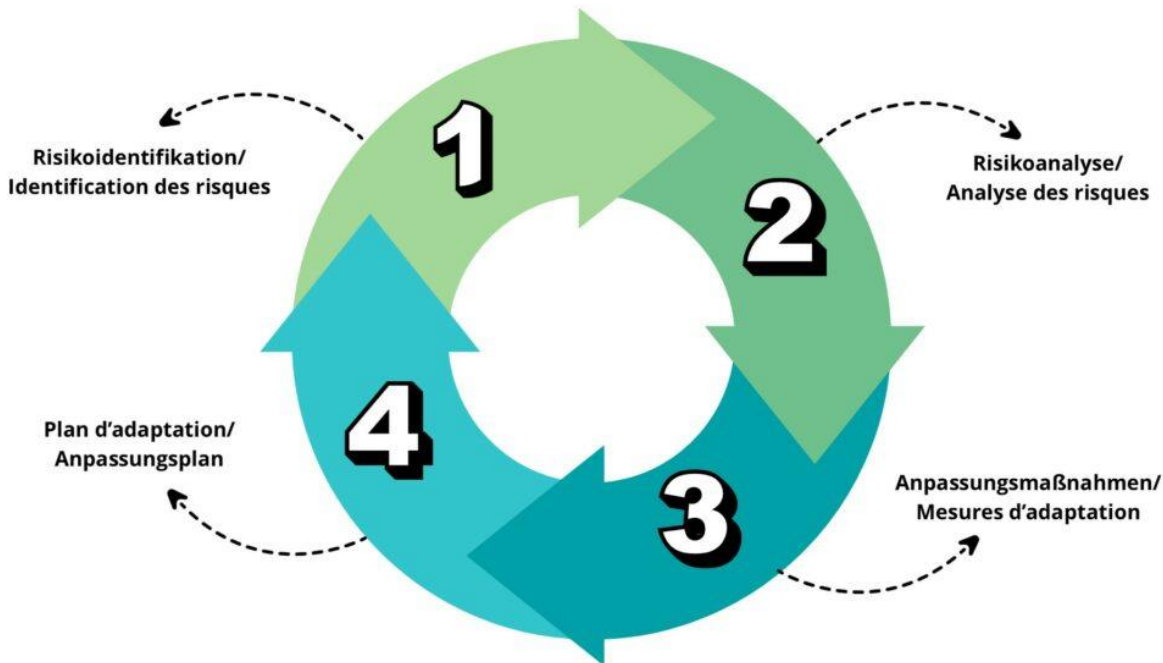
Les ports fluviaux de la région du Rhin supérieur sont également des **hubs économiques et multimodaux**. Ils sont interconnectés avec de nombreux autres acteurs allant des entreprises présentes sur la zone portuaire aux différentes autorités publiques impliquées dans la gestion des voies navigables, des voies ferrées et des connexions routières. En ce qui concerne la voie navigable, c'est plus spécifiquement la notion d'**itinéraire** qui doit être prise en compte : des perturbations à un point précis de la voie navigable peuvent impacter l'ensemble des acteurs situés le long du Rhin car cela peut interrompre l'itinéraire de navigation ou se répercuter sur les interdépendances entre ces acteurs. Le projet CRANE s'est donc attaché à adapter les ports au changement climatique tout en gardant à l'esprit ces notions **d'interconnexions**.



Source : Upper Rhine Ports

1 METHODOLOGIE DU PROJET CRANE

Le projet CRANE s'est déroulé en différentes phases impliquant un **travail partenarial** entre l'institut Fraunhofer IAIS et le Cerema. L'institut Fraunhofer IAIS a commencé par travailler avec les ports sur l'**identification** puis l'**analyse des risques climatiques**. Le Cerema s'est ensuite basé sur ce travail pour mettre en exergue les **mesures d'adaptation** permettant de répondre à ces risques et co-construire avec des ports des **plans d'adaptation** sous la forme de « trajectoire d'adaptation ». Pour faciliter les échanges lors des différents ateliers organisés, les sept ports impliqués dans le projet ont, par ailleurs, été divisés en deux groupes : les ports du « Nord » (Karlsruhe, Ludwigshafen, Mannheim) et les ports du « Sud » (Bâle, Kehl, Mulhouse, Strasbourg).

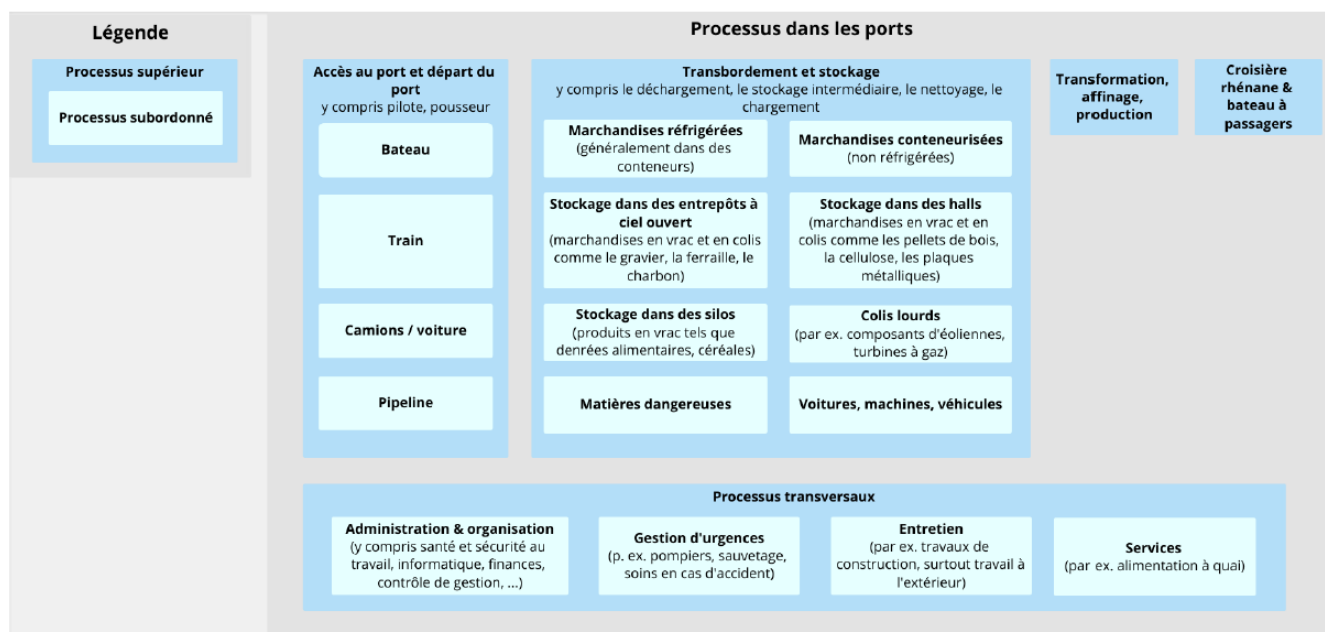


Source : Upper Rhine Ports

1.1 Identification et analyse des risques climatiques

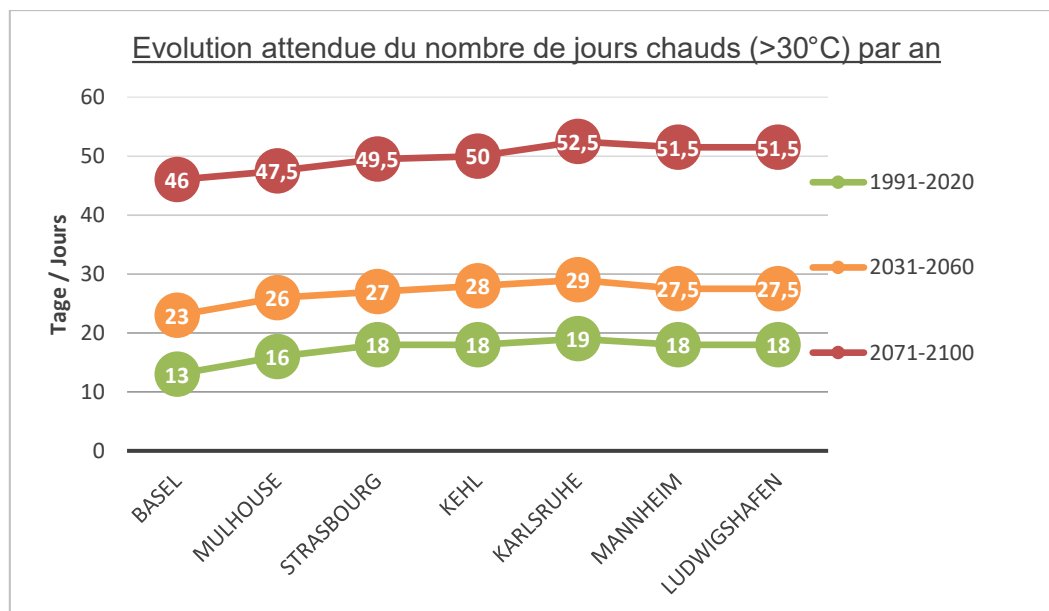
Les phases d'identification et d'analyse des risques climatiques ont été pilotées par l'institut Fraunhofer IAIS. La première étape a consisté à définir les **principales caractéristiques** des zones portuaires pour pouvoir analyser ensuite les risques climatiques de façon pertinente :

- Identification des principaux « **éléments du système** » composant une zone portuaire : par exemple les grues, les entrepôts, les bassins portuaires, les routes et voies d'accès, les voies et les aiguillages ferroviaires ou encore les installations de télécommunications.
- Mise en exergue des principaux **processus** ayant lieu au sein des ports : accès ou départ du port, transbordement et stockage, activités de transformation, d'affinage et de production, croisière et bateau à passager et processus transversaux.
- Un croisement a, par la suite, été réalisé avec chaque port pour identifier le **niveau de criticité** (faible, moyen, élevé, très élevé) de chaque élément du système pour chaque processus portuaire.



Source : Principaux processus portuaires identifiés dans le cadre du projet CRANE, Fraunhofer IAIS

Dans le cadre du projet CRANE, les **huit aléas climatiques** suivants ont été retenus comme pertinents sur la base du référentiel de la Taxonomie verte européenne : les vagues de chaleur, la sécheresse, la variabilité des températures, les fortes précipitations, les inondations, les tempêtes, la baisse des niveaux d'eau et l'affaissement des sols. Pour chaque port et pour chaque élément du système, le projet a permis d'identifier un **niveau de risque** (faible, moyen, fort) sur **chaque horizon de temps** (présent, futur proche 2030-2060, futur lointain 2060-2100) en utilisant des projections climatiques basées sur le **scénario RCP 8.5**. Des **chaînes d'impact** ont également été réalisées pour identifier les potentiels effets en cascade de chaque risque sur le déroulé des activités portuaires.



Source : Evolution attendue du nombre de jours chauds (>30°C) par an pour les sept ports impliqués dans le projet CRANE, Fraunhofer IAIS

En croisant le niveau de criticité de chaque élément du système (faible, moyen, élevé, très élevé) pour chaque processus et le niveau de risque (faible, moyen, fort) sur chaque horizon de temps (présent, futur proche, futur lointain), les **principaux risques** ont pu être identifiés. Les éléments du système ayant une criticité au moins « moyenne » sur au moins un processus et un niveau de risque au moins « moyen » sur au moins un horizon de temps ont été retenus pour la phase « adaptation » du projet.

Chaque port étant différent (emplacement géographique du port, type de port, infrastructures présentes dans la zone portuaire, etc.), les résultats des analyses de risque varient entre chacun des sept ports

impliqués dans le projet CRANE. Certaines tendances communes se dégagent tout de même et des **risques récurrents** ont été identifiés dans le cadre du projet :

- L'impact des vagues de chaleur et des épisodes de fortes précipitations sur les différentes **installations ferroviaires** présentes au sein des ports (voies, aiguillages, équipements de signalisation, etc.) est un point critique à traiter pour les ports ;
- Les **grues et les portiques** sont exposés à des risques climatiques dans chaque port (chaleur, tempêtes ou fortes précipitations) et sont des éléments clefs au cœur des activités de transbordement ;
- Le **personnel** a un rôle incontournable au sein des activités portuaires et les événements climatiques (notamment les vagues de chaleur, les tempêtes, les inondations ou encore les fortes précipitations) peuvent impacter fortement leurs conditions de travail ;
- Les **voies navigables** sont bien évidemment au cœur des activités de transport fluvial et les conditions de navigation sont impactées en cas d'inondations ou d'épisodes de basses eaux ;
- Plus largement, les ports étant une composante essentielle des chaînes logistiques, leurs différentes **connexions aux territoires** (par voies ferroviaires ou routières) sont également clefs pour le transit de marchandises et peuvent être exposées, en fonction des contextes, à de nombreux aléas climatiques (tempêtes, inondations, vagues de chaleur, fortes précipitations, etc.).

Ces différents sujets sont donc au cœur de la démarche d'adaptation mise en place avec les sept ports impliqués dans le projet CRANE.

1.2 Adaptation des ports au changement climatique

Suite à l'identification des principaux risques climatiques, la séquence « adaptation au changement climatique » du projet CRANE a pu être initiée. Le Cerema a piloté cette séquence qui a été structurée autour de deux phases principales :

- L'identification de **mesures d'adaptation** pour répondre aux risques climatiques identifiés par Fraunhofer IAIS
- La co-construction de **trajectoires d'adaptation** avec les sept ports impliqués dans le projet CRANE

Les travaux réalisés au cours de chacune de ces deux phases sont détaillés plus précisément ci-dessous. Ceux-ci s'inspirent et s'appuient sur différents cadres méthodologiques définis précédemment : la méthode **TACCT** créée l'ADEME, la méthode **ASAIT** (Approche Systémique d'Adaptation des Infrastructures de Transport) définie par le Cerema ou encore la **méthodologie proposée par l'association mondiale pour les infrastructures de transport maritimes et fluviales (AIPCN)** pour adapter les ports.

1.2.1 L'identification de mesures d'adaptation

L'objectif de cette première phase de travail était d'identifier des mesures d'adaptation permettant de répondre aux différents risques climatiques identifiés pour chaque port. La première étape a donc consisté à compiler un ensemble de mesures d'adaptation par le biais d'un travail de **benchmark**. Ce dernier a été alimenté par trois sources principales :

- Des **entretiens** avec différents acteurs du transport fluvial ont, tout d'abord, été réalisés. Ces entretiens ont été l'occasion d'échanger avec différents **ports fluviaux et maritimes** européens (Rotterdam, Duisbourg, Anvers-Bruges, etc.) ainsi qu'avec des **acteurs impliqués dans la gestion du Rhin** (Electricité de France, Voies navigables de France ou encore la Commission Centrale pour la Navigation sur le Rhin). Ce travail a permis de faire un état des lieux des premières démarches d'adaptation réalisées par ces acteurs et d'identifier des mesures pertinentes pour les ports impliqués dans le projet CRANE. Une **synthèse de ces entretiens** a été rédigée et a été partagée avec les acteurs du projet.

- Différents **experts du Cerema** ont également travaillé à l'identification de mesures d'adaptation au changement climatique. Une équipe de **onze personnes** mêlant diverses expertises (activités portuaires, ressource en eau, transport routier et ferroviaire, ouvrages d'art, expertise territoriale, etc.) a été mobilisée tout au long du projet et différents **contributeurs additionnels** ont pu apporter leur connaissance sur certains sujets clefs.
- Enfin, des **recherches bibliographiques** (études scientifiques, guides de mesures d'adaptation, plans d'adaptation, etc.) ont permis de compléter la liste de mesures.

Près de **cinq cents mesures d'adaptation** ont pu être identifiées par le Cerema dans le cadre de cette phase de benchmark. Celles-ci ont été réparties en **cinq catégories** à titre indicatif pour faciliter les échanges avec les ports : la gestion du patrimoine, le plan d'exploitation, la gestion de crise, la planification et les autres mesures. L'ensemble de ces mesures a été rassemblé au sein d'un « **référentiel de mesures** » qui a été partagé avec les ports.

En parallèle de ce travail, la réception des résultats des analyses réalisées par Fraunhofer IAIS ont permis d'identifier les **principaux risques climatiques** pertinents pour chacun des sept ports impliqués dans le projet CRANE. Des échanges ont alors été organisés pour **confirmer** avec les ports les principaux **enjeux de leur démarche d'adaptation**.

Les mesures d'adaptation identifiées dans le cadre des travaux de benchmark ont ensuite pu être croisées avec les risques climatiques pertinents pour chaque port. **Pour chaque risque climatique identifié, plusieurs mesures d'adaptation ont pu être proposées.**

Les sept ports impliqués dans le projet CRANE ayant des caractéristiques variées, les risques, et donc les mesures d'adaptation pertinentes pour chaque port, ne sont pas similaires. Une **démarche « sur-mesure »**, adaptée à la situation de chacun des ports, était nécessaire. **Des ateliers** ont donc été organisés pour confronter les mesures identifiées au contexte de port. Un atelier a lieu avec les ports du « Nord » (Karlsruhe, Ludwigshafen, Mannheim) et un autre a été organisé avec les ports du « Sud » (Bâle, Kehl, Mulhouse et Strasbourg).



Source : extrait de l'atelier du 29 avril 2025 organisé par le Cerema à Karlsruhe, photos de Manfred RAUSCH (Port Autonome de Strasbourg)

Ces ateliers ont permis d'obtenir un **retour sur les mesures d'adaptation** identifiées et de **sélectionner au niveau technique les mesures plus pertinentes** pour chaque port. Ces temps de travaux communs ont également donné l'occasion aux ports de mettre en exergue des **enjeux communs** et de **partager des bonnes pratiques** entre eux grâce à l'organisation de **temps d'échange inter-ports** au cours de la journée.

Les résultats de ces ateliers consistent donc en une liste de mesures d'adaptation retenues par chaque port permettant de répondre aux différents risques identifiés par Fraunhofer. Ces résultats ont été **partagés** puis **validés** par chaque port sur le plan technique.

1.2.2 La co-construction de trajectoires d'adaptation

L'objectif de cette seconde phase de travail a été de formaliser, pour chaque port, une **stratégie d'adaptation** au changement climatique sous la forme de « **trajectoires** ». La démarche utilisée ici est directement inspirée de la **méthode TACCT** développée par l'ADEME.

La première étape de ce travail a été de préparer différents éléments permettant de co-construire ces trajectoires d'adaptation avec les ports. Les mesures d'adaptation retenues par chaque port lors du

premier atelier ont ainsi été transcrites sous la forme de **cartes bilingues** (français-allemand). Sur ces cartes figurent :

- Une **description** de chaque mesure d'adaptation ;
- Les **aléas climatiques** qu'elle permet de traiter ;
- Une estimation sur une échelle de 1 à 5 de l'**efficacité** et du **coût** de la mesure. Cette estimation du coût et de l'efficacité a été réalisée à dire d'expert du Cerema et a été donnée à titre indicatif, le contexte spécifique dans lequel se place chaque élément du système dans chaque port ayant une large influence sur ces deux critères.

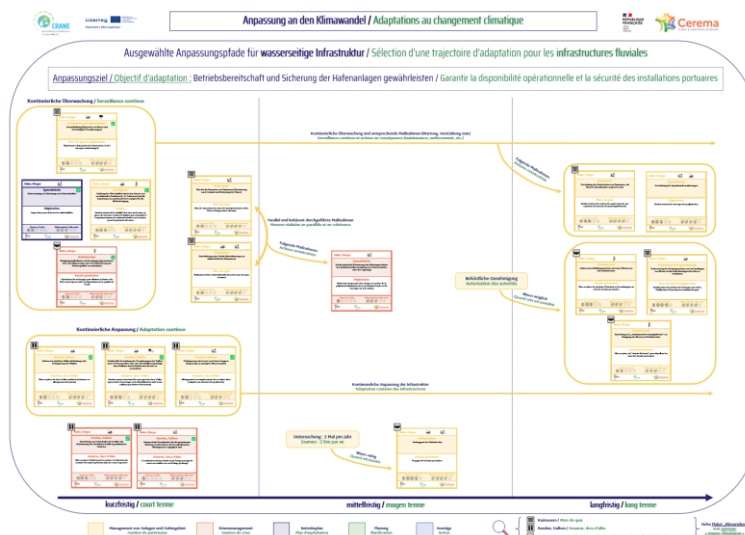
Un **atelier** a ensuite eu lieu avec chaque groupe de ports. Un exercice de projection, basé sur la méthode des **scénarios rose et noir**, a tout d'abord été proposé aux participants. Cet exercice, sous la forme d'un temps d'échange inter-ports, a permis d'inciter les participants à imaginer les **facteurs clefs de réussite** de leur démarche d'adaptation *via* l'utilisation d'un scénario pessimiste et d'un scénario optimiste.

Dans un second temps fort de l'atelier, des trajectoires d'adaptation ont été **co-construites avec chaque port** pour les différents groupes d'éléments du système (les infrastructures de transbordement et de logistique, les infrastructures ferroviaires, les ressources internes, etc.).

Pour chaque trajectoire, les ports avaient donc pour objectif de :

- Fixer un **objectif d'adaptation** pour le groupe d'élément du système concerné dans le but de cadrer la réflexion ;
- **Séquencer la mise en place des mesures** d'adaptation sur **trois horizons de temps** : le court terme, le moyen terme et le long terme ;
- Identifier les **interactions** entre les mesures, les éventuelles **anticipations** à prendre en compte pour certaines mesures ou encore les **actions à mettre en place de façon continue** sur plusieurs horizons de temps.

Durant ces ateliers, entre **huit et dix trajectoires d'adaptation** (une par groupe d'éléments du système, en fonction des risques identifiés par Fraunhofer IAIS) ont été **co-construites avec chaque port**.



Source : exemple d'une trajectoire d'adaptation réalisée avec l'un des sept ports impliqués dans le projet CRANE sur la thématique des « infrastructures fluviales », Cerema

Durant l'atelier, les ports ont également été amenés à sélectionner quelques mesures d'adaptation clefs pour lesquelles ils souhaitaient obtenir des détails complémentaires. Des **fiches détaillées** présentant de manière plus précise ces mesures ont ensuite été rédigées par les équipes du Cerema. Celles-ci ont ensuite été mises à disposition des ports pour les aiguiller dans la mise en place de ces mesures.

Afin de faciliter la prise en main des résultats, un **outil de suivi** opérationnel a, par ailleurs, été créé pour suivre la mise en œuvre des mesures d'adaptation. Cet outil se présente sous la forme d'un tableau de bord Excel qui reprend l'ensemble des informations présentes dans les trajectoires d'adaptation, notamment :

- Les mesures d'adaptation sélectionnées par chaque port ;
- Les caractéristiques de chacune d'entre elles ;
- Les horizons de temps définis pour leur mise en place.

Le format de cet outil de suivi est donc similaire pour tous les ports impliqués mais les données qui le composent sont propres à chacun d'entre eux.

1.2.3 Conclusion sur la méthode utilisée

L'institut Fraunhofer IAIS a mené, avec les ports, un travail collaboratif sur **l'identification** puis **l'analyse des risques climatiques** sous la forme d'ateliers participatifs.

La **participation** et la **co-construction** sont au cœur de la démarche utilisée par le Cerema pour mettre en œuvre la partie « adaptation » du projet CRANE. L'implication des agents techniques et des équipes dirigeantes portuaires ont permis de **contextualiser les mesures proposées** et d'**adapter la démarche retenue à chaque port**.

La définition d'une stratégie d'adaptation en suivant le cadre proposé par les trajectoires d'adaptation est également un point clef de la démarche utilisée dans ce projet. Cela permet notamment :

- D'identifier des **mesures d'adaptation** pour répondre à chaque risque climatique identifié par Fraunhofer puis de prendre du recul et de **raisonner à une échelle plus large** ;
- De **valoriser** les actions déjà mises en place par chaque port et de les intégrer dans une **démarche globale** d'adaptation ;
- De rappeler que certaines mesures correspondent à **des études préalables, diagnostics ou modélisations** indispensables **avant** d'engager des travaux ou **investissements plus lourds** ;
- De raisonner dans le cadre d'une **démarche intégrée** et de mettre en exergue les liens entre les différentes mesures d'adaptation ;
- De rester **flexible** grâce à une méthode dite « adaptative » qui permet de réagir aux évolutions futures du climat.

En complément, l'ensemble des autres livrables qui accompagnent les trajectoires permettent d'apporter une **base théorique** pouvant servir de référence sur l'adaptation au changement climatique (le référentiel de mesures, les fiches détaillées, la synthèse des entretiens réalisés avec différents acteurs externes, etc.) et proposent un **outil de suivi opérationnel** pour suivre la mise en place concrète des mesures d'adaptation.

2 PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DU PROJET

Dans le cadre du projet CRANE, les principaux risques climatiques et les mesures d'adaptation permettant d'y répondre ont été identifiés pour chaque port. Au regard des travaux effectués, de grandes **tendances** se dessinent et permettent d'identifier des **principes clefs** pour l'adaptation au changement climatique des ports fluviaux. Le projet s'est notamment concentré sur les thématiques suivantes :

- Les **terminaux portuaires**
- Les **infrastructures** (fluviales, ferroviaires et routières)
- La **ressource en eau**
- L'intégration des ports au sein de leur **territoire**

Le projet a permis de tirer différents enseignements sur chacune de ces thématiques, notamment sur les principaux enjeux qu'elles comportent et sur la démarche d'adaptation à mettre en place pour y répondre. Ces enseignements sont détaillés ci-dessous.

2.1 Terminaux portuaires

Les terminaux portuaires constituent le **cœur opérationnel** des ports rhénans. Ils regroupent, en sus des pré-acheminements et post-acheminements, deux fonctions indissociables : le **transbordement** (opérations de chargement et déchargement assurées par des grues et engins de manutention) et le **stockage** (terminaux à conteneurs, entrepôts couverts et espaces à ciel ouvert). Ces infrastructures, à la fois critiques et exposées, sont soumises à l'ensemble des aléas climatiques identifiés dans le projet CRANE : vagues de chaleur, tempêtes, fortes précipitations, inondations, étiages et variabilité des températures.

La vulnérabilité des zones de stockage a des conséquences directes sur la chaîne de valeur portuaire : dégradation des marchandises stockées, perte de surfaces exploitables, risque de contamination des bassins portuaires et du Rhin par ruissellement de polluants (hydrocarbures, métaux lourds...). Les enjeux environnementaux et économiques sont donc étroitement imbriqués.

Les analyses de risques ont ainsi mis en évidence que les terminaux présentent une vulnérabilité multi-aléas, accentuée par la densité des installations, la présence de matériaux sensibles à la chaleur et à l'humidité, et la continuité d'exploitation requise. L'accès aux quais par les bateaux et l'acheminement des marchandises, tant en entrée qu'en sortie, conditionnent également directement l'efficacité des terminaux.

2.1.1 Transbordement : Accueil et stabilité des bateaux à quai

2.1.1.1 Contexte et enjeux

L'**accueil des bateaux** à quai constitue une fonction essentielle des infrastructures portuaires fluviales, conditionnant la **sécurité des opérations** de transbordement ainsi que la **continuité des chaînes logistiques**. La **stabilité des bateaux** durant les phases de chargement et de déchargement dépend directement de la capacité des ouvrages portuaires et des systèmes d'amarrage à absorber les sollicitations hydrauliques et mécaniques exercées sur les bateaux.

Dans un contexte de changement climatique, l'**intensification des événements extrêmes** sur le bassin rhénan (vents violents, fortes précipitations, crues plus fréquentes et variations importantes des niveaux d'eau) augmente les contraintes exercées sur les dispositifs d'amarrage et les infrastructures du quai. Ces phénomènes peuvent perturber le positionnement des bateaux, compromettre l'utilisation des équipements de manutention et entraîner des interruptions d'exploitation, voire **des risques pour la sécurité des personnes, des marchandises et des ouvrages portuaires**.

2.1.1.2 Principaux risques et mesures d'adaptation

2.1.1.2.1 Tempêtes et vents violents

Sous l'effet de vents violents, le plan d'eau des bassins portuaires peut présenter une agitation significative, d'autant plus marquée que le plan d'eau est ouvert et exposé. Parallèlement, les bateaux à quai peuvent subir des efforts aérodynamiques liés à la prise au vent de leurs superstructures et de leurs cargaisons, tout comme les engins de manutention installés à terre (portiques, grues de quai) dont les structures hautes et larges constituent des prises au vent importantes. Ces sollicitations combinées induisent des mouvements du bateau, à la fois transversaux et longitudinaux, susceptibles de perturber son positionnement. Il en résulte une augmentation des efforts dynamiques dans les amarres et sur les points d'ancrage (bollards), ainsi qu'un désalignement avec les équipements de manutention, pouvant conduire à l'interruption des opérations de transbordement. Les mesures suivantes concourent à réduire ce risque :

- Sur les terminaux portuaires, **déstockage anticipé** des couches supérieures de conteneurs entreposés à l'air libre afin de réduire leur surface de prise au vent et le risque de renversement ou de déplacement.
- **Arrêt préventif des opérations de levage et mise en sécurité** des engins de manutention installés à terre pour éviter tout déraillement sous la poussée du vent.

2.1.1.2.2 Fortes précipitations

Pour les postes de chargement situés en prise directe sur le Rhin, les fortes précipitations peuvent provoquer une augmentation brutale du débit fluvial, générant des forces hydrodynamiques considérables sur les coques. Ce phénomène ne s'applique pas aux bassins portuaires fermés, où l'absence de courant préserve les bateaux à quai de ces sollicitations hydrodynamiques. Ce courant accru exerce une pression constante qui tend à écarter le bateau du quai ou à le faire dériver, sollicitant les dispositifs d'amarrage bien au-delà de leurs conditions nominales d'utilisation.

Mesures : la répartition des bollards le long du quai doit permettre un schéma d'amarrage optimal. Par ailleurs, le dimensionnement des bollards doit être vérifié pour résister aux efforts de traction horizontaux intensifiés par la vitesse de l'eau.

2.1.1.2.3 Inondations

En période de crue majeure, la montée des eaux peut entraîner le débordement du quai, compromettant la stabilité du front d'eau et l'intégrité des équipements. L'élévation du plan d'eau modifie radicalement la géométrie de l'amarrage : l'angle vertical formé par les amarres devient trop important, générant des forces de soulèvement excessives sur le bateau ou des tensions extrêmes capables d'arracher les amarres ou de provoquer la rupture des câbles.

Pour contrer ces risques, le quai doit disposer d'altitudes d'amarrage diversifiées grâce à l'installation de bollards de crue ou de ducs-d'albe de hauteurs variées. Lorsque les niveaux d'eaux atteignent des seuils critiques rendant le maintien à quai dangereux, une procédure de repli vers des zones refuges, telles que des darses protégées ou des bras morts à faible courant, est impérative pour éviter que le bateau ne dérive ou ne vienne s'encaster sur le couronnement de l'ouvrage.

2.1.1.2.4 Enseignement clefs

Le bon déroulement des opérations de transbordement repose sur la **stabilité des bateaux à quai**, condition indispensable à la **sécurité des opérations** de chargement/déchargement et à l'**intégrité des infrastructures** (quai, équipements d'amarrage, grues). Cette stabilité est directement influencée par les **conditions hydrométéorologiques**.

L'objectif est de **garantir l'immobilité du bateau** par rapport au portique pour assurer la continuité des opérations de manutention et **prévenir les dommages structurels** sur le quai ou la coque.

2.1.2 Transbordement : Grues et engins de manutention

2.1.2.1 Contexte et enjeux

Les **grues et engins de manutention** (portiques, chariots, reach stackers...) constituent l'épine dorsale des opérations de transbordement. Leur exposition aux aléas climatiques est forte : installés à l'air libre sur les terre-pleins ou en bord à quai, ils subissent directement les vagues de chaleur, les vents violents, les précipitations intenses et les inondations. Leur défaillance entraîne des conséquences à la fois opérationnelles et matérielles : arrêt des opérations de chargement/déchargement, interruption des chaînes logistiques, risques pour la sécurité du personnel, mais aussi endommagement ou destruction des engins eux-mêmes, susceptibles de nécessiter des réparations coûteuses ou des remplacements longs à mettre en œuvre.

Ces équipements se caractérisent par leur **complexité technique** : systèmes hydrauliques, composants électroniques embarqués, moteurs thermiques ou électriques, câbles et poulies exposés. Cette hétérogénéité implique des vulnérabilités spécifiques selon l'aléa. Les rails de grues et les fondations des portiques sont également sensibles à l'affaissement des sols, phénomène accentué par les cycles de sécheresse et réhydratation des argiles (retrait-gonflement des argiles) ou de déformations du soutènement des quais liées à des variations hydrauliques.

2.1.2.2 Principaux risques et mesures d'adaptation

2.1.2.2.1 Vagues de chaleur

Le changement climatique induit une augmentation de la fréquence des **pics de température** (scénarios à +45°C/+48°C), poussant les machines hors de leur enveloppe de conception standard :

- **Défaillance** des systèmes de contrôle-commande par la surchauffe des armoires électriques exposées au rayonnement direct, provoquant des arrêts de sécurité intempestifs des automates ;
- **Vieillesse accélérée** des joints, gaines et câbles en polymère soumis à des températures élevées répétées ;
- **Dilatation thermique** des structures métalliques des grues, avec risque de contraintes excessives sur les rails et ancrages, risque de déformation des rails de guidages ;
- **Facteur humain et sécurité** : détérioration des conditions de travail en cabine (stress thermique), augmentant le temps de réaction, le nombre d'arrêts maladie et le risque d'accident lors des manœuvres de précision.

Les principales mesures en réponse à ces aléas sont :

- **Remplacement** des joints, gaines, câbles et fluides par des versions certifiées « haute température » ;
- Application de **revêtements ou de peintures** à fort indice de réflectance solaire (albédo) sur les capotages moteurs et cabines pour réduire la charge thermique ;
- Installation de **groupes froids** dédiés aux armoires électriques et automatisation de la **ventilation** des compartiments moteurs ;
- Migration vers le **Remote Control** (conduite à distance) : l'opérateur est déporté dans un centre de contrôle climatisé, supprimant le risque sanitaire et garantissant la productivité ;
- **Adaptation des horaires de service** (plan canicule : les heures les plus chaudes sont évitées).

2.1.2.2.2 Tempêtes et vents violents

Les grues, et les opérations de chargement/déchargement des bateaux par ces grues, sont parmi les équipements les plus vulnérables aux vents violents en raison de la hauteur, de la surface de prise au vent et de leur poids. Un renversement de grue est un événement catastrophique à la fois pour l'infrastructure et pour la sécurité des personnes et des biens. L'envol ou la chute de marchandises

présentent aussi des enjeux sécuritaires, économiques et environnementaux. Les mesures retenues combinent prévention structurelle et gestion opérationnelle :

- Installation de **capteurs de vent** couplés à une **procédure de mise en sécurité automatique** : freinage assisté et verrouillage mécanique de stationnement (pinces de rail) activé dès l'arrêt complet de l'engin ;
- Renforcement des **fixations** et **ancrages** des équipements mobiles et vérification de leur état après chaque événement ;
- **Arrêt des opérations** et mise en sécurité des équipements dès déclenchement d'une alerte tempête.

2.1.2.2.3 Fortes précipitations

Les fortes pluies affectent les engins de transbordement via plusieurs mécanismes : **infiltration d'eau** dans les composants électriques, formation de flaques sous les équipements entravant la circulation, et **dégradation accélérée** par érosion des sols au niveau des rails de grues et de la zone de circulation des engins de manutention si le drainage est insuffisant. Les principales mesures d'adaptations identifiées dans le référentiel sont :

- **Renforcement des fondations** des rails de grues, portiques et de la zone de circulation des engins de manutention, pour prévenir l'affaissement et le glissement de terrain ;
- Mise en place ou renforcement des **systèmes de drainage** sous les équipements ;
- **Remplacement des joints d'étanchéité** des coffrets électriques par des modèles à haute résistance aux intempéries ;
- **Inspection systématique** post-événement pour détecter l'humidité dans les circuits électriques et hydrauliques.

2.1.2.2.4 Inondations

En cas de crue, les engins de manutention stationnés sur les terre-pleins et les zones de stockages (marchandises et conteneurs) sont directement menacés. La mise en place d'une **logistique de repli** (déplacement préventif) par la mise en œuvre d'un protocole d'évacuation systématique vers des « **zones refuges** » identifiées hors de la cote de crue projetée fait partie des solutions les plus couramment retenues.

2.1.2.2.5 Variabilité des températures et aléas combinés

L'élargissement du spectre des températures sollicite les équipements au-delà de leurs plages de fonctionnement nominales. L'adaptation repose sur la capacité des fluides et des métaux à conserver leurs propriétés physico-chimiques sous des contraintes variables. Les cycles de gel/dégel hivernaux et les amplitudes thermiques saisonnières amplifiées par le changement climatique ont des effets progressifs sur les équipements mécaniques, ainsi ces mesures permettent d'adaptation ces équipements :

- **Choix de composants** tolérants aux cycles de variation de température sur une plage élargie ;
- **Préchauffage** des systèmes hydrauliques et électroniques avant mise en charge par temps froid ;
- Utilisation d'**huiles hydrauliques** adaptées aux variations de chaleurs.

2.1.2.2.6 Enseignement clefs

Les grues et engins de manutention nécessitent une approche d'adaptation à double étage : une **maintenance préventive renforcée** (remplacement des composants sensibles, inspection régulière) et des **mesures de protection opérationnelle** (capteurs, systèmes automatiques, plans canicule/tempête). L'ensemble des ports s'accorde sur la nécessité de diffuser des **bonnes pratiques** aux exploitants de la zone portuaire, qui opèrent leurs propres engins.

2.1.3 Stockage : Terminaux à conteneurs, entrepôts couverts et à ciel ouvert

2.1.3.1 Contexte et enjeux

Les espaces de stockage portuaires constituent une **mosaïque fonctionnelle** : terminaux à conteneurs (dallages bétonnés, équipements de manutention spécifiques...), entrepôts couverts (protection des marchandises sensibles...), et zones de stockage à ciel ouvert (vracs solides, ferraille, bois, granulats...). Chacun présente des vulnérabilités spécifiques aux aléas climatiques, tout en partageant des problématiques communes : gestion des eaux de ruissellement polluées, intégrité des surfaces, protection des marchandises.

2.1.3.2 Principaux risque et mesures d'adaptation

2.1.3.2.1 Vagues de chaleur

La **chaleur extrême** affecte les zones de stockage à travers plusieurs mécanismes : dégradation des dallages bétonnés (fissuration par dilatation), élévation de la température des marchandises stockées (conteneurs réfrigérés, produits chimiques, vracs combustibles...), et risque incendie sur les stocks. De plus, les zones bituminées amplifient considérablement les effets des îlots de chaleur. Dans le cadre du projet CRANE, les mesures d'adaptation suivantes ont notamment été retenues par les ports :

- **Amélioration des systèmes de ventilation et de refroidissement** des entrepôts et conteneurs réfrigérés ;
- Mise en place de **zones de stockage ombragées** ou sous hangars couverts pour les marchandises thermosensibles ;
- Optimisation du **plan de stockage** : isolation des marchandises sensibles à la chaleur, regroupement des conteneurs frigorifiques, ...
- **Surveillance** des fissures sur les surfaces bituminées et bétonnées, augmentation de la fréquence de **maintenance** (pontage des fissures, fraisage) ;
- Installation de **matériaux réfléchissants** sur les surfaces pour limiter l'absorption thermique ;
- **Éviter les stockages prolongés** sur des zones bituminées qui amplifient la chaleur ;
- Installation de **systèmes d'aspersion** automatisés alimentés par des eaux de pluie récupérées, permettant le refroidissement des stocks et le rabattement des poussières ;
- Installation de **systèmes de prévention et de lutte** des incendies et **surveillance** de la chaleur **par capteurs** (pour la détection précoce des points chauds dans les stocks de vrac à ciel ouvert).

2.1.3.2.2 Tempêtes et vents violents

Les stocks à ciel ouvert sont exposés aux déplacements, renversements et envois lors de **vents violents**. Les bâtiments et charpentes des entrepôts couverts peuvent également subir des dommages structurels. Sur le plan technique, plusieurs leviers d'action ont été identifiés :

- Mise en place de **fixations** et systèmes **d'arrimage** renforcés pour les conteneurs et marchandises ;
- **Stockage** des marchandises sensibles dans des **zones fermées ou protégées** avant les alertes tempête ;
- **Optimisation du plan de stockage** à ciel ouvert : réduction de la hauteur des tas, compartimentation des zones pour minimiser la prise au vent ;
- Construction de hangars et entrepôts avec toitures et **structures résistantes aux vents forts** ;
- Mise en place de **protections temporaires** (bâches, filets, géotextiles) sur les matériaux stockés à ciel ouvert ;
- Mise en place d'un plan d'**arrêt des opérations** terrestres de manutention en cas d'alerte tempête.

2.1.3.2.3 Fortes précipitations et ruissellement

Les **fortes pluies** représentent un double enjeu pour les zones de stockage : érosion des sols supports par infiltration non contrôlée et saturation des réseaux d'assainissement avec risque de déversement d'eaux polluées vers les bassins portuaires. Face à ces aléas des mesures concrètes peuvent être mise en place pour réduire la vulnérabilité ou atténuer leurs conséquences :

- **Désimperméabilisation partielle stratégique** (zones de stockage, parkings, zones tampons) des terminaux pour favoriser l'infiltration et limiter la saturation des réseaux d'assainissement ;
- Entretien et renforcement des systèmes de **drainage** (pentes, caniveaux, grilles, etc.) sur l'ensemble des terminaux et entrepôts à ciel ouvert ;
- Système de **récupération des eaux** de toitures pour entrepôts ;
- **Bassins de rétention et de stockage** afin de maîtriser le ruissellement et la qualité des déversements dans les bassins portuaires ;
- **Pavage drainant**, selon les caractéristiques des marchandises stockées.

2.1.3.2.4 Inondations

Les **inondations** constituent un risque soudain et dommageable pour les zones de stockage. La protection des marchandises et équipements, ainsi que la reprise rapide d'activité, sont les priorités :

- **Surélévation** de zones de stockages critiques ou des stocks de marchandises ;
- Investissement dans des **protections mobiles** (batardeaux, barrières gonflables) en cas d'alerte inondation ou construction de **murets de protection** périphériques autour des espaces de stockage stratégiques ;
- **Révision du plan de stockage** : éviter de placer les éléments sensibles dans les zones « basses » ;
- **Renforcement de l'arrimage** des conteneurs pour éviter leur déplacement en cas de montée des eaux ;

2.1.3.2.5 Affaissement des sols

Le **retrait-gonflement des argiles**, amplifié par les cycles de sécheresse et réhumidification couplés à la fluctuation piézométrique, induit des mouvements différentiels des sols supports, mettant en péril l'intégrité des dallages à forte charge. Le défaut de planéité des surfaces de roulage peut rendre inopérants certains engins et compromettre la sécurité des empilements de conteneurs. Ces mesures permettent de répondre à cet aléa :

- Mise en œuvre de plateformes sur **assises traitées** ou **dalles de répartition renforcées** pour neutraliser les effets du retrait-gonflement des sols supports ;
- **Limitation temporaire des hauteurs d'empilement de conteneurs** sur les zones identifiées comme "instables" ;
- **Surveillance** des mouvements de terrain **par capteurs** (tassomètres) pour une détection des mouvements de sol en temps réel, permettant une maintenance prédictive ;
- **Monitoring piézométrique** pour anticiper les tassements différentiels induits par le rabattement des nappes en période de sécheresse.

2.1.3.2.6 Enseignement clefs

La gestion durable des zones de stockage repose sur trois piliers complémentaires : la **protection physique des marchandises** (surélévation, ombrage, arrimage), la **maîtrise des eaux de ruissellement** (drainage, désimperméabilisation, rétention ou ralentissement) et l'**adaptation des pratiques d'exploitation** (plans de stockage révisés, révision des seuils opérationnels). Les mesures à plus fort **impact environnemental positif** (désimperméabilisation, bassins de rétention) sont également celles qui répondent au plus grand nombre d'aléas simultanément.

2.1.4 Conclusion sur les terminaux portuaires

2.1.4.1 Des installations soumises à de nombreux aléas climatiques

L'analyse de vulnérabilité des terminaux portuaires révèle que les installations de transbordement et de stockage sont vulnérables à l'ensemble des aléas climatiques (vagues de chaleur, sécheresse, fortes précipitations, inondations, tempêtes, baisse des niveaux d'eau et à l'affaissement des sols). Cette multi-vulnérabilité impose une **stratégie d'adaptation systémique**, où les mesures doivent être **synergiques** et ne pas créer d'effets contradictoires.

Il existe un lien direct entre la résilience des quais et l'opérabilité des terminaux : la défaillance des quais entraîne immédiatement l'arrêt des opérations de transbordement. Cette interdépendance appelle une planification intégrée des deux thématiques.

2.1.4.2 Le rôle structurant des exploitants

Une spécificité des terminaux portuaires rhénans est la présence d'un grand nombre d'entreprises qui opèrent leurs propres équipements sur les espaces portuaires. Les autorités portuaires ne peuvent adapter seules l'ensemble des installations : la **diffusion de bonnes pratiques aux exploitants** est identifiée comme un levier à très bon rapport coût/efficacité.

Cette dynamique de **responsabilisation à la fois des ports et des exploitants** est également présente dans la définition d'un niveau de service minimum acceptable qui formalise les critères de fonctionnement dégradé des terminaux en situation de crise climatique.

2.2 Infrastructures

Au-delà des activités de transbordement et de logistique, les ports sont également des **hubs multimodaux** qui concentrent de nombreux flux logistiques. De ce fait, ils sont connectés aux territoires par le biais de différentes infrastructures qui sont clefs pour le maintien de ces flux logistiques et donc des activités au sein de la zone portuaire :

- Les **infrastructures fluviales** (dans le cadre du projet, notamment les bassins portuaires, les quais, les berges ou encore les écluses et portes de garde) permettent le bon déroulement de la circulation des bateaux sur les voies navigables jusqu'aux bassins et quais portuaires où les activités de transbordement débutent.
- Les **infrastructures routières** (routes et ponts) et **ferroviaires** (voies ferrées, aiguillages, gare de triage, etc.) permettent ensuite la redistribution des marchandises au sein des territoires par le biais de trains et de camions ou, inversement, la centralisation des marchandises au sein du hub portuaire en amont d'une expédition par bateau permettant de massifier les échanges.

La gestion de ces infrastructures fait partie des opérations courantes réalisées par les ports ou leurs partenaires (filiales, entreprises externes, autorités publiques, etc.) en fonction du périmètre de compétence exercé par chaque acteur. Dans le cadre du changement climatique, c'est le **spectre des conditions** auxquelles ces infrastructures sont exposées qui **s'élargit** : amplitude thermique plus importante (phénomènes de gel/dégel en hiver et très fortes chaleurs en été), alternance d'épisodes de sécheresse et de fortes précipitations, augmentation de l'occurrence et de l'intensité des phénomènes de crues mais également des phénomènes de basses eaux, etc.

Ces nouvelles conditions climatiques peuvent avoir un impact sur l'**état des infrastructures** présentes au sein des ports (structure fragilisée, vieillissement prématuré, détérioration accélérée des matériaux, etc.) et sur leur bon **fonctionnement** (infrastructure inutilisable, arrêt temporaire du fonctionnement ou fonctionnement en mode dégradé, etc.).

2.2.1 Infrastructures fluviales

2.2.1.1 Contexte et enjeux

Dans le cadre du changement climatique, ce sont plus particulièrement la multiplication et l'intensification des épisodes d'**inondations** et de **basses eaux** qui sont un défi pour la gestion des

infrastructures fluviales. En effet, ces infrastructures sont conçues pour opérer dans un certain contexte et sous certains équilibres qui peuvent être amenés à évoluer avec le changement climatique.

Tout d'abord, des phénomènes d'inondations plus récurrents ou plus intenses peuvent déstabiliser les différentes infrastructures fluviales *via* l'accroissement des **pressions** exercées sur les structures. La **fonctionnalité** des infrastructures peut également être **limitée ou interrompue** : quais submergés, amarrages rendus inadaptés, accostage impossible, navigation interrompue, etc.

L'intensification et la multiplication des épisodes de basses eaux ont également un impact sur la **stabilité** des quais et des berges notamment (cela provoque des changements dans l'équilibre des forces). Certaines **infrastructures** peuvent aussi devenir **inadaptées** dans ce contexte : escaliers fixes devenus trop courts pour être fonctionnels, pontons ou systèmes d'amarrages inadaptés aux basses eaux, etc.

Dans une moindre mesure, la multiplication des épisodes de **fortes chaleurs** ou de **fortes précipitations** est aussi un facteur de détérioration accélérée des infrastructures fluviales. Par exemple, une vague de chaleur particulièrement intense peut participer à l'apparition de **fissurations** dans le béton des murs de quai. Des composants sensibles à la chaleur présents au sein de certaines infrastructures peuvent également être impactés. Pour les écluses, cela peut se traduire, par exemple, par la **dilatation** d'éléments métalliques ou une usure prématurée des joints d'étanchéité ou encore des dysfonctionnements sur certains équipements électromécaniques. Les épisodes de fortes précipitations génèrent également des contraintes importantes sur les infrastructures. L'augmentation des ruissellements et des débits peut provoquer des phénomènes **d'érosion des berges, d'affouillement** au pied des ouvrages, **d'accumulation de sédiments** ou **d'embâcles**, ainsi qu'une sollicitation accrue des systèmes de drainage et d'évacuation des eaux pluviales. Ces phénomènes peuvent fragiliser les structures à moyen terme.

Pour maintenir les infrastructures fluviales en état fonctionnel, il est donc important de prendre en compte cette nouvelle donne climatique. L'anticipation de ces évolutions nécessite d'**adapter la gestion** de ces infrastructures mais aussi d'**investir** pour renforcer certaines structures. Les principales mesures d'adaptation retenues par les ports dans le cadre du projet CRANE sont présentées ci-dessous.

2.2.1.2 Principales mesures d'adaptation

► **Des mesures organisationnelles**

Certaines mesures organisationnelles sont nécessaires pour adapter les infrastructures fluviales au changement climatique. Tout d'abord, il est essentiel de commencer par **clarifier les rôles** joués par chaque acteur (collectivités, partenaires institutionnels, ports, etc.) dans la gestion de ces infrastructures. Si des zones d'ombre subsistent encore sur le sujet, c'est un prérequis incontournable avant d'engager des démarches d'adaptation.

Le renforcement de la **coopération** entre ces acteurs et la **mutualisation d'infrastructures** pour mieux gérer les crises peut également apporter de nombreux avantages. Cela peut passer par la mise à disposition de zones d'amarrages, de quais et de bassins adaptés aux basses eaux ou d'espaces « **refuge** » pour les bateaux en cas d'inondations.

Toujours dans le domaine de la gestion de crise, il est aussi important de prévoir des mesures adaptées pour protéger les infrastructures, les bateaux et les personnes et préserver l'activité lorsque cela est possible : **ajustement des systèmes d'amarrage** en cas d'inondations, **fermeture** des quais inutilisables, **arrêt temporaire** du fonctionnement de certaines infrastructures (les écluses par exemple), etc. En parallèle, le **report multimodal**, vers le ferroviaire notamment, peut permettre de préserver la continuité des flux logistiques.

En complément, des **exercices réguliers de gestion de crise** permettent de s'assurer que les acteurs sont prêts à réagir de façon adéquate lors de ces événements (exercice de mise en place d'une porte de garde mobile par exemple).

► **Des actions de sauvegarde du patrimoine existant**

Des interventions directes sur les infrastructures sont également nécessaires pour s'assurer qu'elles restent en état fonctionnel. Il est notamment important de réaliser des **inspections** des infrastructures

en cas d'événements climatiques extrêmes pour détecter et traiter en amont les risques de dégradation. Ces inspections permettent de **renforcer la maintenance** de manière ciblée pour limiter les risques (réparation des fissures, des ancrages fragilisés, etc.). Mener une politique de maintenance adéquate permet, en effet, d'éviter d'avoir à investir plus lourdement par la suite lorsque le stade de dégradation de l'infrastructure est trop avancé. La notion de « renforcement » des opérations de maintenance a donc été retenue par la majorité des ports dans le cadre du projet CRANE.

Sur certaines infrastructures, il peut aussi être pertinent d'aller plus loin et de **remplacer** préventivement **les composants les plus sensibles** par des systèmes plus résistants. Par exemple, pour les écluses ou les portes de garde fixes, la surélévation des composants électroniques clefs, tels que le système de commande, peut être intéressant pour certaines installations.

Enfin, dans certains cas, il peut être nécessaire de **réduire les charges** sur les infrastructures les plus sensibles pour limiter les risques. Par exemple, il peut être intéressant de limiter le stockage et la circulation en arrière des quais fragilisés.

► **Des investissements plus lourds pour renforcer certaines infrastructures**

Les ports doivent également réaliser des investissements pour renforcer les infrastructures fluviales et limiter le risque de dégradation et de rupture. Il est, tout d'abord, nécessaire de réaliser des **études** spécifiques pour les infrastructures les plus sensibles pour s'assurer que le dimensionnement d'origine reste adapté malgré les évolutions attendues en lien avec le changement climatique. Dans le cadre du projet CRANE, la majorité des ports ont notamment prévu de réaliser des études pour **identifier les quais à risque** au sein de leurs zones portuaires (pour plus de détails, voir la fiche détaillée sur le sujet) et, pour les ports concernés, de **vérifier** également que leur **porte de garde** est conçue pour faire face aux inondations plus intenses qui sont attendues.

Suite à ces études, des mesures de consolidation des infrastructures devront être menées lorsque cela est nécessaire. Cela passe, par exemple, par le **renforcement des fondations** des quais, la **consolidation des ancrages** de palplanches ou encore par des mesures de **stabilisation des berges** (mise en place de gabions, de géotextiles, utilisation de solutions fondées sur la nature, etc.). Le **redimensionnement**, après audit structurel, de certaines infrastructures, telles que les **systèmes d'amarrage** ou les **ducs d'albe**, doit également être réalisé pour qu'elles puissent rester fonctionnelles lors d'épisodes d'inondations ou de basses eaux plus intenses. Pour les portes de garde, il est aussi pertinent, pour certains ports, d'installer des **portes de garde manœuvrables** par système mécanique (en remplacement de portes amenées par bateau par exemple) ou de **renforcer les installations existantes** (renforcement conjoint de la capacité d'étanchéité et de l'intégrité structurelle sous fortes charges hydrauliques, notamment grâce à une mise à niveau des dispositifs d'obturation) en fonction des débits attendus pour s'assurer que le port restera protégé en cas d'inondations.

2.2.1.3 Enseignements clefs

Pour maintenir les infrastructures fluviales en état fonctionnel dans le contexte du changement climatique, diverses solutions existent. Il est notamment nécessaire de **renforcer les processus existants de gestion** de ces infrastructures (inspection, maintenance, mesures de gestion de crise adaptées, etc.) mais aussi de vérifier leur dimensionnement et, lorsque cela est nécessaire, d'investir pour les **renforcer**, les **consolider**, les **adapter** ou les **rehausser**.

2.2.2 Infrastructures ferroviaires

2.2.2.1 Contexte et enjeux

La prise en compte des aléas climatiques est un enjeu clef pour la résilience des infrastructures ferroviaires. C'est un sujet qui fait, d'ores et déjà, partie intégrante des opérations de gestion courantes mises en place sur les réseaux ferrés. Cependant, dans le cadre du changement climatique, celles-ci vont devoir évoluer et s'accompagner d'investissements pour permettre de maintenir un niveau de service satisfaisant. En effet, le changement climatique apporte son lot de nouveaux enjeux qu'il faudra prendre en compte dans le futur :

- L'amplitude thermique à laquelle les infrastructures vont être exposées va augmenter (avec des **variations de températures** parfois très rapides) et les épisodes de **fortes chaleurs** vont devenir plus récurrents et plus intenses. Les infrastructures ferroviaires présentes dans la région du Rhin supérieur ne sont actuellement pas forcément conçues pour résister à ces températures, ce qui peut, par exemple, générer des contraintes thermiques importantes dans les rails pouvant entraîner des phénomènes de flambement de la voie, ou encore affecter le fonctionnement des systèmes électroniques (signalisation, détection, contrôle) exposés à des températures élevées.
- Les épisodes de **fortes précipitations** plus fréquents et plus intenses posent notamment des problèmes en termes de stabilité des infrastructures (phénomènes d'affouillement par exemple).
- Par ailleurs, le risque que des épisodes de **crues** touchent les infrastructures ferroviaires augmente. C'est plus particulièrement la quantité de tronçons exposés ou le degré d'impact de ces épisodes de crues sur les infrastructures (épisodes plus violents provoquant des dégâts plus importants) qui pourraient s'accroître.
- Le risque en lien avec les **tempêtes** et l'impact des vents forts sur les voies ferrées (notamment les chutes d'arbres) restera également un sujet à avoir en tête pour les gestionnaires de voies ferrées. Sur ce point, l'impact du changement climatique reste cependant incertain.
- **Feux de végétation** : les sécheresses prolongées augmentent le risque d'incendies de végétation à proximité des voies ferrées. Si ce risque concerne en priorité les grands réseaux nationaux, certaines voies ferrées portuaires traversant des zones végétalisées peuvent également y être exposées. Les projets de végétalisation des abords de voies — par ailleurs bénéfiques pour la gestion thermique et le ruissellement — devront intégrer ce risque dans le choix des espèces et des modes d'entretien.

Les infrastructures ferroviaires seront donc soumises à des conditions climatiques moins stables et plus extrêmes. Cela va accentuer les **phénomènes d'usure** des matériaux et l'occurrence d'événements climatiques extrêmes plus récurrents et plus intenses devra être pris en compte pour éviter les **défaillances**. Une anticipation de ces phénomènes et la mise en place de mesures d'adaptation est donc nécessaire pour maintenir un niveau de service stable.

Dans le cadre du projet CRANE, il est également important de préciser que les mesures d'adaptation traditionnelles du secteur ferroviaire ne sont pas forcément applicables de manière similaire aux réseaux ferrés portuaires. En effet, ces réseaux restent spécifiques du fait de leur taille et des propriétés des voies présentes sur une zone portuaire. Cela nécessite l'ajustement de certaines mesures d'adaptation classiques et en disqualifie d'autres. Les **principales mesures d'adaptation** identifiées comme pertinentes dans le cadre du projet sont détaillées ci-dessous.

2.2.2.2 Principales mesures d'adaptation

► Des mesures de gestion de crise

Les **mesures de gestion de crise** permettent d'appréhender l'occurrence de phénomènes climatiques extrêmes plus sereinement et sont donc incontournables dans la cadre de l'adaptation au changement climatique. Ces mesures ont ainsi été retenues par la majorité des ports impliqués dans le projet CRANE.

Sur ce sujet, il est tout d'abord important de commencer par identifier les **tronçons ferroviaires critiques** au sein de la zone portuaire et de définir un **plan de priorisation** des équipements clefs pour la continuité d'activité. De cela découle la définition d'un **plan de gestion de crise** comprenant des procédures d'urgence et permettant de mobiliser rapidement des équipes d'intervention disposition d'équipements spécifiques adaptés à la crise traversée. Enfin, certaines mesures ponctuelles permettent de maintenir une activité en mode dégradée : utilisation de **locomotive thermique** si l'alimentation électrique est perturbée, recours à la **signalisation manuelle** lors que les systèmes électroniques sont hors d'usage ou encore **limitation de la vitesse** de circulation lors des pics de chaleur.

► Une maintenance et un suivi de l'état des infrastructures renforcés

L'usure des matériaux étant accélérée par le changement climatique, il est nécessaire de renforcer le suivi de l'état des infrastructures ferroviaires et les opérations de maintenance associées. Les ports du projet CRANE ont notamment choisi d'accentuer les opérations de surveillance des infrastructures telles que les tournées d'**inspection visuelle**, l'**installation de capteurs** et le **monitoring par télémétrie** de l'état de ces infrastructures, le tout en lien avec une **surveillance accrue des conditions météorologiques** locales et un **système d'alerte** associé.

Les informations collectées par le biais de ces opérations de surveillance permettent par la suite de renforcer les opérations de maintenance. Cela passe notamment par la définition d'un **plan de gestion saisonnier** des infrastructures pour anticiper les risques, la mise en place d'un plan de **maintenance préventive** ou encore la réalisation d'**opérations d'élagage** autour des infrastructures sensibles. Lorsque cela est nécessaire, il peut aussi être pertinent de remplacer certains composants sensibles par des **composants plus résistants** (par exemple, aux fortes chaleurs).

► Des nécessaires adaptations structurelles plus profondes pour protéger les infrastructures

Au-delà des mesures de gestion de crise et de maintenance renforcée, les ports doivent également investir dans certaines mesures d'adaptation plus lourdes pour garantir un maintien du service. Le renforcement et l'amélioration générale des **systèmes de drainage** est notamment une mesure récurrente qui a été identifiée par les sept ports du projet CRANE pour protéger, entres autres, les infrastructures ferroviaires. Il est plus spécifiquement nécessaire de mettre en place une **démarche intégrée** au niveau des zones portuaires pour gérer de manière transversale les risques de fortes précipitations et d'inondations (voir partie 2.3 Ressource en eau ci-dessous). Cela peut consister, par exemple, à engager des diagnostics hydrauliques fins à l'échelle de l'emprise portuaire permettant d'identifier les points bas sensibles et de redimensionner localement les ouvrages de collecte (fossés, caniveaux, bassins de rétention), en intégrant des scénarios de pluies extrêmes

Au niveau des infrastructures en elles-mêmes, il peut aussi être pertinent de renforcer leur stabilité en mettant en œuvre des **techniques de stabilisation du sol**. Par exemple, la mise en place de géogrilles en interface sol/support de voie permet d'améliorer la portance des plateformes ferroviaires en conditions dégradées et de limiter les phénomènes de déformation sous trafic après saturation en eau. Il peut aussi être pertinent de mettre les voies ferrées sur **ballast**, lorsque cela est possible, pour limiter l'impact des épisodes de fortes précipitations. De manière localisée, la mise en place de **boîtiers étanches** autour des équipements les plus sensibles peut aussi être utile. Moyennant un investissement qui peut être assez conséquent, certains ports du projet CRANE ont également favorisé pour des mesures de **surélévation** de certaines installations critiques ou de certains tronçons ferroviaires clefs particulièrement exposés aux risques de crues.

En complément de ces mesures permettant de gérer les risques liés aux inondations et aux fortes précipitations, des mesures pour limiter l'impact des fortes chaleurs. Les ports impliqués dans le projet CRANE ont notamment plébiscité l'utilisation de la technique des **longs rails soudés**. Dans certains cas, il est possible d'utiliser des **matériaux réfléchissants** ou de la peinture blanche pour limiter l'échauffement des surfaces, de renforcer l'**isolation** autour de certains composants sensibles ou encore de mettre en place une **redondance mécanique** sur les systèmes électriques (aiguillage ou signalisation par exemple) soumis à un risque de défaillance.

2.2.2.3 Enseignements clefs

Les événements climatiques extrêmes impactant les infrastructures ferroviaires vont se multiplier, il est donc crucial de renforcer la **capacité des ports à gérer les crises** associées. En parallèle, la résilience de ces infrastructures doit être renforcée par le biais d'opérations de **surveillance** et de **maintenance** pour limiter les risques de défaillance. Des **investissements** plus lourds sont également inévitables pour adapter le réseau ferroviaire aux nouvelles conditions climatiques.

Enfin, il est important de ne pas oublier que les infrastructures ferroviaires portuaires sont liées aux **réseaux ferrés nationaux** (français, allemand et suisse dans le cas du projet CRANE). Les flux logistiques ferroviaires sont ainsi dépendants du bon fonctionnement de ces réseaux et les notions

d'interopérabilité et d'interface entre les réseaux nationaux et portuaires doivent également être prise en compte (pour plus de détails, voir la fiche détaillée sur le sujet).

2.2.3 Infrastructures routières

2.2.3.1 Contexte et enjeux

La typologie d'aléas climatiques pouvant impacter le réseau routier des ports est assez similaire à celle touchant les infrastructures ferroviaires, même si ces dernières restent plus sensibles (présence de composants électriques par exemple). Ainsi, les principaux aléas à prendre en compte dans le cadre du changement climatique sont les suivants :

- La multiplication et l'intensification des épisodes de **fortes chaleurs** ce qui peut entraîner une détérioration accélérée des revêtements.
- L'augmentation de l'intensité des événements de **fortes précipitations** qui peuvent déstabiliser les infrastructures ou poser des problèmes de praticabilité des routes.
- De même, le risque **d'inondations** est en augmentation et le nombre de tronçon routier exposé à cet aléa peut augmenter dans certaines zones.
- Enfin, le risque de chutes d'arbres sur les voies de circulation suite à des épisodes de **tempêtes** reste un aléa à prendre en compte pour les gestionnaires des réseaux routiers, même s'il y a encore beaucoup d'incertitude quant à l'évolution de ce risque dans le cadre du changement climatique.

Les infrastructures routières seront donc soumises à des conditions climatiques plus extrêmes et moins stables. Dans ce cadre, il sera notamment nécessaire de mettre en place des procédures robustes de gestion de crise et de renforcer la maintenance pour **maintenir la praticabilité** des infrastructures. Les principales mesures d'adaptation des infrastructures routières retenues par les ports dans le cadre du projet CRANE sont détaillées ci-dessous.

2.2.3.2 Principales mesures d'adaptation

► Anticiper et gérer les crises

La **hiérarchisation** des tronçons routiers critiques à maintenir praticable au sein des zones portuaires est une action clef. C'est une mesure qui a été retenue par la majorité des ports de projet CRANE et qui doit être le point départ de la démarche d'adaptation.

En complément, et sur le même principe que pour les infrastructures ferroviaires, il est nécessaire de formaliser un **plan de gestion de crise**. Celui-ci doit permettre de déployer des **équipes d'intervention rapide** en cas de crise, de mettre en place des **itinéraires de détour** et de **signaler** de manière dynamique les **voies condamnées**. Les équipes doivent également disposer du **matériel adapté** pour gérer les crises (par exemple des tronçonneuses, des nacelles élévatrices ou encore des broyeuses pour gérer les chutes d'arbres liés aux tempêtes sur les voies de circulation).

Enfin, il peut être intéressant de mettre en place certaines mesures ponctuelles pour limiter les risques lors des crises. Par exemple, la mise en place de **limitations temporaires de vitesse** lors des épisodes de fortes chaleurs peut être envisagée afin de réduire les sollicitations sur des chaussées dont le module est diminué. Cette mesure relève principalement de la gestion de la sécurité. Elle peut également, dans certaines conditions de trafic, contribuer marginalement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en favorisant des régimes de circulation plus homogènes.

► Renforcer la maintenance et adapter les matériaux

Dans le cadre du changement climatique, les infrastructures routières vont être soumises à des pressions plus importantes. Il est donc nécessaire d'anticiper cela en adaptant les matériaux utilisés et en renforçant les opérations de maintenance.

Tout d'abord, il est important de **suivre l'état des infrastructures** en réalisant des inspections régulières et mettant en place, lorsque c'est nécessaire, des technologies de détection des

affaissements par exemple. Cette surveillance permettra de mettre en place des opérations de maintenance adéquates qui seront nécessairement plus fréquentes et qui deviendront un véritable enjeu pour maintenir le réseau en bon état. Cela passe notamment par des **réparations** régulières des routes, **maintenance préventive** et opérations de **renouvellement des revêtements** en amont des épisodes les plus intenses de canicule, **plan d'élagage** ou encore une augmentation de la **fréquence du graissage** des éléments mécaniques des ponts tournants.

De plus, pour augmenter la résilience du réseau, la majorité des ports a également pré-sélectionné des mesures d'**adaptation aux fortes chaleurs des revêtements** utilisés combinés à l'usage de peintures claires ou de matériaux réflectifs pour réduire les échauffements de certaines surfaces (trottoirs par exemple). Des détails complémentaires sur les possibilités techniques associés à ces solutions sont disponibles dans la fiche détaillée rédigée à ce sujet.

Enfin pour les ports impliqués dans le projet CRANE qui sont concernés, des adaptations plus spécifiques sur les ponts sont prévues dans le cadre de leur démarche d'adaptation, notamment l'utilisation d'**asphalte à faible dilatation** et le **redimensionnement des joints de chaussée** pour limiter l'impact des fortes chaleurs sur ces infrastructures.

► **Réaliser des investissements pour protéger les infrastructures routières**

Dans certains cas, des investissements plus lourds sont également nécessaires pour permettre de maintenir dans le temps la praticabilité des infrastructures routières. De même que pour les infrastructures ferroviaires, un travail sur le **redimensionnement des réseaux de drainage** à l'échelle des zones portuaires permettra de limiter les risques en lien avec les épisodes de fortes précipitations et de crues (voir partie 2.3 Ressource en eau ci-dessous).

Par ailleurs, il est également important de réaliser des **études** plus précises pour vérifier quelles routes et quels ponts présents sur la zone portuaire vont être exposés à des risques d'inondations plus importants en fonction des hauteurs d'eau attendues dans le cadre du changement climatique. En fonction des résultats de ces études, il pourra être utile de **surélever** certaines de ces infrastructures ou de **renforcer certains ponts** via l'utilisation d'**enrochement** ou de **palplanches** par exemple.

Enfin, la baisse des niveaux d'eau peut également impacter les fondations de certains ponts présents au sein des zones portuaires. Cet impact doit être étudié au cas par cas et, si nécessaire, les **fondations** des ponts exposés doivent être **renforcées**, voire **remplacées**.

2.2.3.3 *Enseignements clefs*

La base de la démarche d'adaptation des infrastructures routières au sein des ports doit être la **hiérarchisation** des axes prioritaires. De cet exercice découle différentes adaptations allant de la formalisation de la **gestion de crise** en passant par le **suivi renforcé** de l'état des infrastructures et l'adaptation des **matériaux** utilisés pour gérer les pressions croissantes que va exercer le changement climatique. Dans certains cas, et en fonction de l'exposition propre à chaque port, des **investissements plus importants** sont également nécessaires pour protéger certaines infrastructures des impacts des inondations et de la baisse des niveaux d'eau notamment.

Enfin, de même que pour le réseau ferré, il est également nécessaire de prendre en considération les **connexions** du réseau routier portuaire avec les réseaux routiers gérés par des acteurs tiers (villes, départements, Länder, Etats, etc.). Une coordination et une coopération renforcée avec ces acteurs est nécessaire dans le cadre de la démarche d'adaptation des ports impliqués dans le projet CRANE (voir partie 2.4 Intégration des ports au sein de leur territoire ci-dessous).

2.2.4 **Conclusion sur les infrastructures**

Sur le volet « infrastructures », l'adaptation au changement climatique consiste à étendre le spectre des conditions auxquelles ces infrastructures peuvent résister (amplitude thermique plus grande, alternance de sécheresse et de fortes précipitations, phénomènes de crues mais aussi de basses eaux plus récurrents et plus intenses, etc.) pour garantir leur maintien en bon **état** et leur bon **fonctionnement**.

Pour cela, les ports doivent travailler sur trois axes principaux. La formalisation d'une **gestion de crise** appropriée et de procédures pour rétablir rapidement les services ou fonctionner en mode dégradé est une première étape clef. En parallèle, le renforcement de la **maintenance** et du **suivi de l'état** des infrastructures permet de limiter le risque de défaillance. Enfin, des **investissements plus lourds** restent également nécessaires pour améliorer la résilience des infrastructures en adaptant les matériaux utilisés, en consolidant les structures ou en mettant en place de nouvelles infrastructures de protection.

De manière générale, il est aussi important que les ports restent ouverts à l'**innovation** et adoptent une attitude de veille sur ces sujets pour réaliser les opérations d'adaptation les plus adéquates.

2.3 Ressource en eau

La **ressource en eau** constitue l'une des thématiques centrales de l'adaptation des ports rhénans au changement climatique. Le Rhin et ses nappes alluviales représentent une ressource vitale pour les activités portuaires — navigation, approvisionnement en eau des entreprises, lutte contre l'incendie, refroidissement industriel, gestion des ruissellements — mais cette ressource est soumise à des pressions croissantes et antagonistes : d'un côté, des épisodes d'inondations et de fortes précipitations de plus en plus fréquents et intenses ; de l'autre, des périodes d'étiage prolongé et de sécheresse qui réduisent les niveaux d'eau et la disponibilité de la ressource.

Dans le cadre du projet CRANE, le Cerema a identifié, évalué et retenu, avec les sept ports partenaires (Karlsruhe, Ludwigshafen, Mannheim, Bâle, Kehl, Mulhouse, Strasbourg) des mesures d'adaptation couvrant trois défis majeurs liés à la ressource en eau :

- **Étiages** : baisse des niveaux d'eau et réduction des capacités de navigation ;
- **Inondations et fortes précipitations** : saturation des réseaux, submersions et dommages aux infrastructures ;
- **Sécheresse** et consommation d'eau : tension sur l'approvisionnement des entreprises portuaires et enjeux de sobriété.

2.3.1 Étiages et baisse des niveaux d'eau du Rhin

2.3.1.1 Contexte et enjeux

Les **étiages** constituent l'un des aléas climatiques les plus immédiatement préoccupants pour les ports rhénans. Les projections climatiques pour le bassin du Rhin indiquent une augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des épisodes de basses eaux, résultat de la combinaison d'étés plus chauds, de la diminution du manteau neigeux alpin et d'une évapotranspiration accrue (FOEN, 2021 ; IKS/CIPR, 2020). Lors des étiages exceptionnels de 2018 et 2022, certains tronçons du Rhin ont vu leurs niveaux atteindre des minimums historiques, rendant la navigation commerciale impossible pendant plusieurs semaines et engendrant des pertes économiques pour les chargeurs et armateurs.

Au-delà des perturbations directes de la navigation, les étiages posent des défis spécifiques aux infrastructures portuaires : impact sur la stabilité de certaines infrastructures ou encore réduction de la capacité des systèmes anti-incendie dépendant des prises d'eau fluviale.

2.3.1.2 Principales mesures d'adaptation

Le projet CRANE a permis d'identifier plusieurs catégories d'actions face aux étiages, allant des actions de plaidoyer institutionnel à l'adaptation des flottes de navires et des pratiques d'exploitation.

► Actions de plaidoyer et de coordination territoriale

Les actions de plaidoyer auprès des autorités hydrauliques pour améliorer la gestion des niveaux d'eau du Rhin ont été retenues par la majorité des ports. Ces actions s'inscrivent notamment dans le cadre du plan opérationnel « **Aktionsplan Niedrigwasser Rhein** » (plan d'action Basses Eaux Rhin), qui vise à sécuriser des conditions de navigation fiables en période d'étiage à travers des mesures d'aménagement du lit du fleuve, de stockage et de retenue des eaux.

La **coordination** entre acteurs portuaires et autorités de l'eau est également placée au premier rang des priorités : mise en place de cellules de gestion de crise en période de basses eaux (planification des débits réservés, réduction concertée des prélèvements...). Cette approche collaborative, retenue par plusieurs ports, illustre la nécessité d'une gouvernance multi-acteurs de la ressource fluviale.

► Adaptation des accès fluviaux

Sur le plan technique, plusieurs leviers d'action pour maintenir l'accès fluvial et la sécurité incendie ont été identifiés. Le **dragage** régulier des bassins portuaires et du lit du Rhin permet notamment de maintenir les tirants d'eau nécessaires. Cela soulève toutefois des enjeux environnementaux négatifs (perturbation des fonds, mobilisation des sédiments potentiellement pollués) qui doivent être anticipés. Le **réaménagement des dispositifs sécurité-incendie** est également nécessaire dans certains ports. Cela passe par l'adaptation des prises d'eau aux niveaux bas mais aussi, si nécessaire, par la mise en service de citernes tampons ou la mutualisation inter-entreprises des dispositifs de stockage d'eau.

Des mesures complémentaires sur les **infrastructures fluviales** en elle-même ont également été pré-sélectionnées dans le cadre du projet CRANE et sont détaillées dans la partie précédente (voir partie 2.2.1 Infrastructures fluviales ci-dessus).

► Adaptation des flottes et des pratiques d'exploitation

L'**adaptation des bateaux** aux contraintes des basses eaux est un sujet clef pour garantir la navigation sur le Rhin. L'investissement dans des bateaux à faible tirant d'eau (matériaux plus légers, optimisation des hélices, design adapté) représente un coût élevé, mais une efficacité très forte. Des solutions d'adaptation ponctuelle, comme le projet européen Novimove (ajout de flottabilité supplémentaire à des bateaux existants), font également partie des solutions permettant d'apporter une réponse pragmatique et progressive à cet enjeu. Un **dialogue** entre les ports et les transporteurs est nécessaire pour concrétiser la mise en place de ces mesures.

L'adaptation des **pratiques d'exploitation** passe aussi par l'évolution des modalités de gestion des stocks par les entreprises présentes sur la zone portuaire, l'allocation d'espaces de stockage supplémentaires pour les marchandises en attente lors des périodes d'arrêt de navigation, et l'amélioration de la multimodalité (report vers le ferroviaire) comme solution de substitution en cas de crise.

2.3.1.3 Enseignements clefs

La gestion des étiages illustre la **limite de l'action strictement portuaire** : les ports ne maîtrisent ni le débit du Rhin ni la politique d'aménagement hydraulique du fleuve. C'est pourquoi les **actions de plaidoyer institutionnel** et la **coordination avec les autorités de l'eau** (autorités nationales, CIPR/IKSR) sont identifiés comme leviers indispensables, combinés à des **adaptations techniques internes**.

2.3.2 Inondations et fortes précipitations

2.3.2.1 Contexte et enjeux

Le changement climatique se traduit non seulement par des sécheresses plus fréquentes, mais aussi par une intensification des événements de **précipitations extrêmes**. Pour les ports rhénans, cela se manifeste à deux niveaux : des **crues** du Rhin potentiellement plus intenses, et une **saturation accrue des réseaux d'assainissements** lors d'épisodes pluvieux intenses (pluies à forte intensité de courte durée).

Il convient toutefois de distinguer deux mécanismes d'inondation aux dynamiques bien distinctes :

- **L'inondation par ruissellement pluvial**, amplifiée par l'imperméabilisation des zones portuaires, qui réduit la capacité naturelle d'absorption des sols et concentre rapidement les eaux en surface ;

- **L'inondation par débordement fluvial**, qui résulte d'une rupture de digue ou d'un dépassement local de la capacité du lit du fleuve, se traduisant par un écoulement avec un courant parfois fort et une montée des eaux potentiellement lente mais durable.

Ces deux types d'inondation appellent des mesures d'adaptation en partie spécifiques. En complément des solutions de gestion des eaux pluviales, les ports directement exposés au risque de débordement du Rhin devront envisager des mesures de protection dédiées : ouvrages de protection et d'écroulement des crues, coordination avec les gestionnaires de digues et les autorités compétentes en matière de gestion des débits, et mise en place de dispositifs de protection mobiles (batardeaux, sacs de sable...) pour les accès et équipements sensibles.

2.3.2.2 Principales mesures d'adaptation

► **Désimperméabilisation et gestion des eaux pluviales à la source**

Dans le cadre du projet CRANE, la **désimperméabilisation** a été identifiée comme l'une des mesures les plus efficaces et les plus bénéfiques sur le plan environnemental pour répondre aux problématiques hydrologiques. Elle a été retenue par l'ensemble des ports pour les espaces où elle est techniquement faisable. Elle consiste à :

- **Remplacer les revêtements imperméables** (utilisation de pavés drainants, de bétons poreux adaptés aux charges lourdes portuaires, etc.) ;
- Mettre en place des **noues d'infiltration** (végétalisées ou non) pour favoriser l'infiltration à la source ;
- Créer des **bassins de rétention** et de décantation pour stocker temporairement les eaux pluviales et filtrer les polluants avant rejet au milieu ;
- Développer des **zones végétalisées** multifonctionnelles contribuant à la biodiversité et à la régulation thermique (solutions fondées sur la nature).

Les zones portuaires présentent la spécificité de posséder de nombreux sols pollués ce qui impose la mise en place de dispositifs complémentaires : prétraitement des eaux via des séparateurs à hydrocarbures, confinement par géomembranes, etc.

Les images ci-dessous présentent des exemples de solutions de gestion des eaux pluviales à la source.



Pavés drainants à joints enherbés (à gauche), parking alvéolaire engazonné au centre (Ecovégétal), enrobé drainant à droite (Applied technologies)



Noûe infiltrante au droit d'un bâtiment (Cerema)

► Renforcement des systèmes d'assainissement et de protection des infrastructures

En parallèle de la gestion à la source des eaux pluviales, des mesures de protection des infrastructures existantes face aux risques d'inondation et de fortes précipitations sont indispensables :

- **Redimensionnement** et entretien régulier des réseaux d'assainissement et des gouttières ;
- Installation de **vannes et clapets anti-retour** pour éviter le refoulement des eaux usées dans les bâtiments en cas de saturation du réseau ;
- Mise en place de **bassins de rétention** pour écrêter les pics de ruissellement avant évacuation vers le réseau ou la station d'épuration ;
- Investissement dans des **digues mobiles ou systèmes de protection temporaires** (barrages modulaires, gonflables...) pour les bâtiments et sous-sols vulnérables ;
- **Surélévation** des installations et équipements critiques dans les zones à risque.

► Urbanisation résiliente et planification territoriale

La résilience hydrique dans les projets d'aménagement futurs fait partie intégrante des stratégies d'adaptation des ports. Elle doit être intégrée dans les révisions des documents de planification tels que les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU) et les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI). Cette approche s'inscrit dans le cadre des orientations de la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE) et des Plans de Gestion des Risques d'Inondation (PGRI). Elle se traduit notamment par la mise en place de **zones tampons absorbantes**, de **bassins d'orage**, ainsi que par des actions de **coordination** avec les collectivités dans le cadre de la révision de leur document d'urbanisme.

► Gestion de crise

La gestion de crise face aux risques naturels (inondations, tempêtes, canicules extrêmes) relève en premier lieu de la compétence des autorités publiques — Préfecture en France, Lander en Allemagne, Canton en Suisse — qui coordonnent les dispositifs d'alerte, de protection des populations et de rétablissement des conditions normales. Les ports sont parties prenantes de ces dispositifs, sans en être les pilotes. Dans ce cadre, les procédures internes de gestion de crise des opérateurs portuaires doivent s'articuler avec les plans de secours des autorités compétentes, et être élaborées, renforcées et mises à jour régulièrement :

- **Plans d'évacuation** du personnel et de protection des équipements sensibles ;
- **Pompes** mobiles pour soulager les réseaux d'assainissements saturés ;
- Cellules de **gestion de crise** et systèmes d'alerte précoce (prévisions hydrologiques...) ;
- **Plan communal de sauvegarde**

- **Zones d’abri** et procédures de sécurisation des bateaux en cas de crue.

2.3.2.3 Enseignements clefs

La gestion des inondations en milieu portuaire rhénan nécessite une **approche combinée à deux échelles** : la **gestion des eaux pluviales** à l’intérieur de la zone portuaire (désimperméabilisation, assainissement, rétention) et la **coordination avec les acteurs du territoire** pour la gestion des crues fluviales. Les **solutions fondées sur la nature** sont régulièrement identifiées comme des réponses à co-bénéfices multiples (biodiversité, régulation thermique, qualité de l’eau...).

2.3.3 Sécheresse — Consommation d’eau des entreprises portuaires

2.3.3.1 Contexte et enjeux

La **sécheresse** constitue une menace croissante pour la disponibilité de la ressource en eau utilisée par les entreprises implantées sur les zones portuaires rhénanes. Si l’eau est indispensable à de nombreux usages industriels et logistiques — refroidissement, nettoyage, lutte contre les incendies, approvisionnement sanitaire — les épisodes de sécheresse prolongées et répétées conduisent à des restrictions et à un conflit d’usages entre les différents acteurs du bassin versant.

Les projections climatiques pour le Rhin prévoient une diminution des précipitations estivales et une augmentation de l’évapotranspiration, conduisant à une réduction de la recharge des nappes alluviales qui constituent la principale source d’eau potable et industrielle de la région. Les entreprises à forte consommation d’eau (industrie chimique, raffineries, installations de refroidissement) sont particulièrement exposées à ce risque.

2.3.3.2 Principales mesures d’adaptation

► **Sobriété et efficience hydrique**

La première ligne de réponse identifiée dans le cadre du projet CRANE est celle de la réduction des consommations à la source :

- Mise en place de **mesures d’économie d’eau** : technologies de réutilisation et de recyclage de l’eau industrielle, récupération des eaux de pluie pour les usages non potables (arrosage, nettoyage, toilettes) ;
- **Sensibilisation** du personnel à l’usage raisonné de la ressource en eau, avec mise en place de plans de hiérarchisation des usages en période de restriction ;

► **Sécurisation de l’approvisionnement en eau**

Plusieurs ports ont retenu des mesures visant à sécuriser leur approvisionnement en eau indépendamment des réseaux d’adduction en eau potable et du débit du Rhin :

- Mise en place de **système de collecte des eaux de pluie** sur la zone portuaire pour favoriser l’autosuffisance (mesure retenue par tous les ports selon le référentiel) ;
- Pour les ports disposant de puits ou de forages internes : aménagement de **zones de protection** de captage, installation de capteurs pour éviter le pompage en cas de pollution détectée ;
- Développement de **solutions de stockage d’eau** : citernes, bâches à incendie pour l’eau non potable, bassins de rétention dimensionnés pour les périodes de sécheresse ;
- **Coordination** avec les fournisseurs d’eau externes pour l’élaboration de plans de gestion en situation de pénurie.

► Gestion des bassins portuaires en période de fortes chaleurs et de sécheresse

En période de fortes chaleurs et de bas débit, la qualité de l'eau des bassins portuaires se dégrade : augmentation des températures, développement de cyanobactéries, anoxie des fonds. Voici quelques mesures spécifiques retenues dans le cadre du projet CRANE qui permettent d'y répondre :

- Systèmes **d'aération et de mélangeurs** au sein des bassins portuaires ;
- Mise en place de « **marais flottants** » pour dépolluer naturellement les eaux ;
- **Opérations de nettoyage** pour éliminer la faune et la flore mortes.

2.3.3.3 Enseignements clefs

La sécheresse révèle la forte **dépendance** des zones portuaires à la ressource en eau issue d'un système d'adduction d'eau potable, du pompage dans la nappe ou dans le Rhin. Les mesures de **sobriété hydrique** et d'**autosuffisance** (collecte des eaux pluviales, recyclage) sont des priorités à court terme pour les ports. Elles présentent l'avantage d'être à la fois peu coûteuses, applicables rapidement et porteuses de co-bénéfices environnementaux.

2.3.4 Conclusions sur la ressource en eau

L'analyse transversale des trois problématiques liées à la ressource en eau révèle un **paradoxe** caractéristique du changement climatique en zone tempérée : les ports rhénans doivent simultanément se **protéger contre l'excès** (inondations, ruissellement) et **le manque d'eau** (étiages, sécheresse). Cette double pression impose des solutions d'adaptation qui soient compatibles entre elles et porteuses de synergie.

La désimperméabilisation illustre parfaitement cette synergie : elle réduit le ruissellement en cas de fortes pluies, favorise le rechargement des nappes et augmente le confort thermique par la création d'îlots fraîcheurs. **Les solutions fondées sur la nature** sont ainsi placées au cœur des stratégies d'adaptation des ports du Rhin.

2.4 Intégration des ports au sein de leur territoire

L'un des enseignements majeurs du projet CRANE est que **l'adaptation des zones portuaires ne peut pas être pensée à la seule échelle de l'emprise portuaire**. Les travaux menés dans le cadre du projet montrent au contraire que les ports doivent être appréhendés comme des systèmes ouverts, en interaction constante avec leur environnement proche, leurs voies d'accès, les réseaux et chaînes logistiques qu'ils mobilisent, les entreprises qu'ils accueillent et les autorités publiques qui encadrent leur développement. Dans le cadre du benchmark, les entretiens menés avec une diversité de ports et d'instituts confirment cette lecture : **les aléas climatiques agissent comme des révélateurs de dépendances critiques, qu'il s'agisse des accès au port, des réseaux, des interfaces logistiques ou des installations stratégiques**.

À ce titre, les **connexions aux territoires** apparaissent comme un sujet central. Durant les ateliers, les ports ont souligné que la continuité de fonctionnement dépend largement de la robustesse des accès routiers et ferroviaires, ainsi que de leur articulation avec des infrastructures parfois hors de leur contrôle direct. Les échanges ont également montré que ces sujets relèvent fréquemment d'une gouvernance partagée : certaines routes appartiennent aux ports, d'autres aux municipalités/collectivités, certains aménagements nécessitent l'intervention d'autorités publiques, et les solutions passent souvent par l'intermodalité, la coordination de crise, le travail étroit avec les gestionnaires de réseaux et, plus largement, avec les acteurs publics et privés intervenant sur les espaces de connexion. L'adaptation portuaire ne consiste donc pas seulement à renforcer un ouvrage, mais à **sécuriser des continuités fonctionnelles à l'interface entre le port et son territoire**.

Le projet met aussi en évidence l'importance de **l'interface port-ville**. Durant les échanges avec les ports, il a été souligné que certaines vulnérabilités portuaires se construisent hors du port lui-même, en lien avec certains choix d'aménagement du territoire, tels que la densité et l'implantation du bâti, l'imperméabilisation des sols, l'organisation des accès ou encore la saturation d'infrastructures

partagées. En retour, les choix d'aménagement portuaire produisent eux aussi des effets sur leur environnement proche. Les discussions montrent ainsi que certaines mesures d'adaptation supposent de travailler avec des acteurs tiers, en particulier les autorités locales, ce qui peut complexifier mais aussi enrichir les trajectoires d'adaptation. Au-delà d'une logique technique, l'adaptation portuaire suppose ainsi une **capacité de dialogue avec les territoires riverains et une prise en compte des effets croisés entre fonctionnement portuaire et fonctionnement urbain**.

Cette réalité renvoie directement à la place du port dans son **environnement urbanistique et réglementaire**. Les ateliers ont montré que plusieurs leviers d'adaptation dépendent de cadres qui dépassent la seule maîtrise d'ouvrage portuaire : règles d'urbanisme, politiques locales d'aménagement, prévention des risques, gestion de l'eau, arbitrages fonciers ou prescriptions sectorielles. Les ports ont également souligné que certaines obligations réglementaires peuvent entrer en tension avec d'autres objectifs d'adaptation (par exemple entre installation de panneaux solaires et végétalisation des toitures). De même, la disponibilité foncière constitue une contrainte forte : végétaliser ou désimperméabiliser certains espaces peut réduire des surfaces de stockage ou se heurter à la présence d'occupants tiers. Dès lors, l'adaptation des ports appelle un meilleur **arrimage aux documents et cadres qui organisent l'aménagement de ces territoires, la mobilité, la gestion de l'eau et la prévention des risques**.

Les enseignements du projet convergent aussi vers une intégration plus forte des **enjeux liés à la nature, à la biodiversité, à l'environnement, à la surchauffe et, plus globalement, à la transition écologique**. Les ateliers et les trajectoires co-construites avec les ports ont mis en évidence les limites d'une artificialisation accrue des zones portuaires : multiplication des surfaces minérales, aggravation de la surchauffe et de l'inconfort thermique, moindre infiltration des eaux pluviales et externalités négatives sur le fonctionnement global des sites. À l'inverse, les échanges ont fait ressortir l'intérêt de faire émerger des solutions plus sobres et « vertes », susceptibles d'apporter des co-bénéfices environnementaux, qu'il s'agisse de **végétalisation**, de **désimperméabilisation**, de **gestion intégrée des eaux pluviales** ou de dispositifs plus largement fondés sur la nature. Pour autant, les échanges montrent que les solutions fondées sur la nature en milieu portuaire doivent être **contextualisées et pensées au cas par cas**, notamment lorsque les sols sont pollués ou lorsque les exigences logistiques limitent les marges de transformation. Les choix opérés dépendent également des caractéristiques des infrastructures et des bâtiments, de leur structure, de leurs usages et des contraintes d'exploitation. **L'intégration de la nature dans les ports doit donc être recherchée dans une logique de compatibilité technique et d'efficacité opérationnelle**.

Enfin, au-delà des mesures elles-mêmes, le projet montre que l'intégration territoriale des ports repose sur une **gouvernance élargie** et sur le **développement d'une culture commune du risque**. Les entretiens et les ateliers ont mis en évidence des niveaux de maturité variables selon les acteurs, mais convergent sur un point : la coopération, la mise en réseau des parties prenantes et le partage d'une compréhension commune des vulnérabilités conditionnent la réussite de l'adaptation.

La fiche synthétique de mesure consacrée à la culture du risque souligne d'ailleurs que cette dynamique doit dépasser le cadre interne du port et associer également les partenaires extérieurs. L'adaptation des zones portuaires apparaît ainsi comme un **processus à la fois spatial, organisationnel et partenarial, qui suppose d'inscrire durablement les ports dans les stratégies de résilience de leur territoire**.

3 CONCLUSION

Le projet CRANE est un projet transfrontalier, réalisé en langue française et allemande, qui a permis **d'anticiper les effets du changement climatique** et de **planifier la mise en œuvre d'une démarche d'adaptation** au sein des sept ports de la région du Rhin Supérieur grâce à un travail réalisé en partenariat entre l'institut Fraunhofer IAIS et le Cerema.

Les sept ports impliqués dans le projet évoluent dans des **contextes différents**. L'**emplacement géographique** de chacun d'entre eux implique des enjeux distincts, les **infrastructures** présentes au sein de chaque zone portuaire sont variées, le **modèle de gestion et de propriété** de chaque port est propre à sa situation. Des grandes **tendances** se dessinent, tout de même, sur les principaux enjeux de l'adaptation au changement climatique :

- Pour garantir le bon état et le bon fonctionnement des infrastructures et des terminaux portuaires, il existe différentes solutions que les ports vont pouvoir mettre en place. Ils vont tout d'abord pouvoir faire évoluer leur modèle de **gestion de crise** pour garantir la **continuité d'activité** et être capable de continuer à fonctionner en mode dégradé. Un **renforcement** de la **maintenance** et du suivi général de l'état des infrastructures permettra également d'anticiper les risques de dégradation pour les traiter préventivement. Des **investissements** seront aussi réalisés pour **protéger** et **renforcer** certaines structures clefs sur le long terme, tout en continuant à favoriser l'**innovation** pour que les ports deviennent de plus en plus **résilients**.
- Le **personnel** des ports doit être au cœur de la démarche d'adaptation. Les agents sont directement impliqués dans les opérations réalisées au sein des zones portuaires et leur vision est clef pour **cerner les enjeux** de l'adaptation, **y apporter des réponses** et garantir la **continuité d'activité**. Le projet CRANE a permis d'**initier une dynamique** sur ce sujet grâce à une méthodologie de travail basée sur la **participation** et la **co-construction**. Les ports souhaitent continuer à impliquer leur personnel dans cette démarche pour conserver cette dynamique positive.
- Enfin, le projet CRANE a mis en exergue l'importance pour l'adaptation au changement climatique des ports de prendre en compte les **interconnexions** entre différents acteurs : les gestionnaires de voies navigables, ferrées et routières, les autorités publiques locales, les transporteurs, les entreprises portuaires et, bien sûr, les ports. Ces derniers ne doivent pas être adaptés de manière isolée, la **coopération** entre partenaires et leurs actions concertées sont déterminantes pour garantir la résilience du transport par voies fluviales. Un **travail commun** est notamment nécessaire pour adapter les voies navigables, les bateaux et les accès ferroviaires et routiers à chaque zone portuaire. Dans le cadre de la mise en œuvre de leur démarche d'adaptation, les ports impliqués dans le projet CRANE seront ainsi particulièrement attentifs à ces interconnexions et ont souhaité également **continuer à travailler ensemble** sur ces sujets.

En conclusion, le changement climatique représente un défi pour les ports fluviaux mais des **solutions d'adaptation existent**. Au sein des sept ports de la région du Rhin Supérieur, certaines mesures sont déjà en place. L'objectif est donc de continuer à **anticiper** et de **poursuivre la mise en place d'actions**. Dans ce cadre, le projet CRANE a permis de **structurer la démarche** d'adaptation des ports impliqués, **d'opérationnaliser** sa mise en place, d'**enrichir la base de mesures** à disposition et de **préciser leur modalité** de mise en œuvre, tout en **sensibilisant** les différents acteurs portuaires. Ce projet a également contribué à diminuer les **incertitudes** pour le fonctionnement des zones portuaires induites par le changement climatique. Le degré d'incertitude résiduel, impliqué par le recours à des simulations climatiques, a été **pleinement intégré dans la méthode utilisée** et est pris en compte dans les démarches d'adaptation définies avec chaque port. A la suite de ce projet, il reste important que les **ports fassent vivre leur stratégie d'adaptation** en continuant à la faire évoluer en intégrant les évolutions futures du climat.

4 ANNEXES

4.1 Bibliographie

4.1.1 Méthodologie

- ADEME (2023). Méthodologie TACCT (Trajectoires d'Adaptation au Changement Climatique des Territoires). <https://tacct.ademe.fr/>
- Cerema (2020). Méthode Approche Systémique d'Adaptation des Infrastructures de Transport (ASAIT). Fiche technique.
- Union européenne (2020). RÈGLEMENT (UE) 2020/852 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 18 juin 2020 sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables et modifiant le règlement (UE) 2019/2088. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/eng?eliuri=eli%3Areg%3A2020%3A852%3Aoj&locale=fr>
- PIANC (2020). Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways. PIANC Report N°178. World Association for Waterborne Transport Infrastructure. <https://www.pianc.org/publication/climate-change-adaptation-planning-for-ports-and-inland-waterways-2>

4.1.2 Terminaux

4.1.2.1 *Adaptation climatique des ports et terminaux*

- PIANC (2020). Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways. PIANC Report N°178. World Association for Waterborne Transport Infrastructure. <https://www.pianc.org/publication/climate-change-adaptation-planning-for-ports-and-inland-waterways-2>
- PIANC (2023). Waterborne Transport, Ports and Waterways: A 2023 Update of Climate Change Drivers and Impacts. EnviCom Task Group 3. World Association for Waterborne Transport Infrastructure. <https://www.pianc.org/publication/waterborne-transport-ports-and-waterways-a-2023-update-of-climate-change-drivers-and-impacts/>
- PIANC (2014). Sustainable Ports – A Guide for Port Authorities. World Association for Waterborne Transport Infrastructure. <https://www.pianc.org/publication/sustainable-ports-a-guide-for-port-authorities/>
- Climate-ADAPT (2023). Adaptation des infrastructures portuaires au changement climatique. European Environment Agency. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>

4.1.2.2 *Vagues de chaleur, îlots de chaleur urbains et infrastructures*

- ADEME (2024). Fiches solutions d'adaptation thermique et hydrique pour les aménagements industriels. Plusfraichemaville.fr. <https://plusfraichemaville.fr/fiche-solution>
- Poumadère, M., Mays, C., Le Mer, S., Blong, R. (2005). The 2003 Heat Wave in France: Dangerous Climate Change Here and Now. Risk Analysis, 25(6), 1483–1494. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00694>.

4.1.2.3 *Inondations, ruissellement et gestion des eaux polluées*

- Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (Directive-Cadre sur l'Eau). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>
- Directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32007L0060>

- BRGM (2023). Infiltration des eaux pluviales au droit d'anciens sites industriels et de friches polluées. <https://www.brgm.fr/fr/solutions/infiltration-eaux-pluviales-au-droit-anciens-sites-industriels-friches-polluees>
- Grand Est DREAL (2020). Doctrine pluviale Grand Est. Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement. https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/doctrine_pluviale_grand_est-compressé.pdf

4.1.2.4 Affaissement des sols et résilience des dallages

- PNACC-3 — Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (2025). Mesure 30. Ministère de la Transition écologique, Paris. <https://www.ecologie.gouv.fr/dossiers/france-sadapte/3e-plan-national-dadaptation-changement-climatique>
- Note d'information Ouvrages d'art — Impact du changement climatique sur les ouvrages d'art en France : conseils aux gestionnaires et concepteurs. Cerema (2021). <https://www.cerema.fr/fr/actualites/impact-du-changement-climatique-ouvrages-art-france-conseils>

4.1.2.5 Stockage de marchandises sensibles et sécurité industrielle

- Directive 2012/18/UE (SEVESO III) relative à la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32012L0018>

4.1.3 Infrastructures

4.1.3.1 Infrastructures fluviales

- Cerema (2019). Analyse de risque des ponts en site affouillable : un guide du Cerema.
- Cerema (2020). Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie.
- Cerema (2020). Méthode Approche Systémique d'Adaptation des Infrastructures de Transport (ASAIT). Fiche technique.
- Cerema (2021) Impact du changement climatique sur les ouvrages d'art en France : conseils aux gestionnaires et concepteurs.
- CETMEF (2001). ROSA 2000 : Recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique.
- CETMEF (2005). Utilisation du béton précontraint en site aquatique : Éléments de réflexion.
- Grand Port Maritime de Bordeaux (2020). Analyse de risque dans un contexte de changement climatique et stratégie de résilience.
- Méthodologie VSC (2011). Application de la méthode Visite Simplifiée Comparée (VSC) à la gestion d'un parc d'ouvrages portuaires.
- Ministère de la Transition Écologique. Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), volet infrastructures et systèmes de transport, action 1 – Adaptation des infrastructures et systèmes de transport au changement climatique.
- PIANC (2023). Waterborne transport, ports and waterways: a 2023 update of climate change drivers and impacts. EnviCom – Task Group 3, Climate Change and Navigation.
- PIANC (2020). Climate change adaptation planning for ports and inland waterways. Report N°178.
- Port Atlantique La Rochelle (2024). Adaptation au changement climatique du Port Atlantique de La Rochelle : Diagnostic et stratégie de résilience.

4.1.3.2 Infrastructures ferroviaires

- UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (2014). Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks-
- https://unece.org/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014.pdf

- Jägare, V., Juntti, U. & Garmabaki, A.H.S. (2024). Roadmap for implementing climate adaptation innovations in railway. International Journal of System Assurance Engineering and Management. <https://doi.org/10.1007/s13198-024-02581-8>
- UIC, the Worldwide Railway Organization (2017). RAIL ADAPT Adapting the railway for the future - https://uic.org/IMG/pdf/railadapt_final_report.pdf
- Cerema (2019) Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/32507>

4.1.3.3 Infrastructures routières

- PIARC (2023). Measures for Improving Resilience of Pavements. <https://www.piarc.org/en/order-library/42341-en-Measuresfor%20improving%20resilience%20of%20pavements%20-%20Technical%20Report>.
- PIARC (2019). Reducing the Life Cycle Carbon Footprint of Pavements. <https://www.piarc.org/en/order-library/31426-en-Reducing%20the%20Life%20Cycle%20Carbon%20Footprint%20of%20Pavements%20-%20Technical%20Report>
- EPA (2005). Cool Pavement Report. https://rodoviasverdes.paginas.ufsc.br/files/2010/05/CoolPavementReport_Former-Guide_complete.pdf
- Global Cool Cities Alliance (2012). A Practical Guide to Cool Roofs and Cool Pavements. https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/pdfs/CoolRoofToolkit_Full.pdf
- EUPAVE (2018). Achieving and Maintaining the Evenness of Concrete Pavements. <https://www.eupave.eu/resources/publication-achieving-and-maintaining-the-evenness-of-concrete-pavements/>

4.1.4 Ressources en eau

4.1.4.1 Étiages et gestion des basses eaux

- IKSR / CIPR (2020). Rapport sur les effets du changement climatique sur les étiages du Rhin. Commission Internationale pour la Protection du Rhin, Coblenze.
- BfG (2022). Aktionsplan Niedrigwasser Rhein — Maßnahmen und Bewertungen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Coblenze.
- Novimove Project (2022). Novel Inland and Maritime Mobility. EU Horizon 2020. <https://www.novimove.eu>
- CCNR / CNRS (2022). The impact of low water levels on Rhine navigation: Lessons from the 2018 and 2022 events. Central Commission for the Navigation of the Rhine.
- Jonkeren, O., Rietveld, P., van Ommeren, J. (2007). Climate change and inland waterway transport: Welfare effects of low water levels on the River Rhine. Journal of Transport Economics and Policy, 41(3), 387–411.

4.1.4.2 Inondations et gestion des eaux pluviales

- CEREMA (2023). Techniques alternatives de gestion des eaux pluviales en milieu contraint. Guide méthodologique. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.
- European Commission (2015). Natural Water Retention Measures. Technical Report 2014-082. Publications Office of the EU.
- Rey F. (2025). Des Solutions fondées sur la Nature. Une réponse aux défis environnementaux et sociétaux. Versailles, éditions Quæ, 120 p. <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4060-9>
- Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (Directive-Cadre sur l'Eau).
- Directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation.

- GRAIE (2020). Guide des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. https://www.mavillepermeable.fr/uploads/resource/2016_graie_techniques-alternatives.pdf

4.1.4.3 Sécheresse et ressource en eau

- GIEC / IPCC (2022). Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- G. Laaha, T. Gauster, L. Tallaksen, Jean-Philippe Vidal, K. Stahl, et al.. The European 2015 drought from a hydrological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21 (6), pp.3001-3024. <https://hal.science/hal-01586707/file/ly2017-pub00055094.pdf>
- FOEN (2021). Hydrological yearbook of Switzerland 2020 — Drought and low water analysis. Federal Office for the Environment, Berne.: https://scnat.ch/de/uuid/i/1a4359de-34c9-56b1-92fb-55f7fef71a37-Hydrologisches_Jahrbuch_der_Schweiz_2020
- Meissner, R. et al. (2020). Drought impacts on water quality and aquatic ecosystems in Rhine River catchments. *Environmental Science & Policy*, 112, 300–311. https://www.econstor.eu/bitstream/10419/222269/1/Pena_Guerrero_2020_Drought_impacts_Chile.pdf
- Programme INTERREG Rhin Supérieur (2021). Évaluation Stratégique Environnementale (ESE) du Programme INTERREG VI Rhin Supérieur 2021-2027. Rapport scientifique. <https://www.interreg-rhin-sup.eu/wp-content/uploads/rapport-ese-et-memoire-de-reponse.pdf#page=35&zoom=100,90,289>

4.1.4.4 Ressources complémentaires

- Climate-ADAPT (2023). Adaptation des infrastructures au changement climatique. European Environment Agency. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/metadata/publications/adapting-infrastructure-to-climate-change>
- CEREMA (2019). Recommandations pour la commande d'études d'infiltrabilité des sols. https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/17420/recommandations-pour-la-commande-d-etudes-d-infiltrabilite-des-sols?_lg=fr-FR
- Grand Est DREAL (2020). Doctrine pluviale Grand Est. Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement. https://www.grand-est.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/doctrine_pluviale_grand_est-compresse.pdf
- Plusfraichemaville.fr. Fiches solutions d'adaptation thermique et hydrique pour les aménagements urbains. ADEME. <https://plusfraichemaville.fr/fiche-solution>

4.1.5 Territoire

- AIVP, Association internationale des villes portuaires (2015). Faire-la-ville-avec-le-port : guide de bonnes pratiques. https://www.aivp.org/wp-content/uploads/2021/01/AIVP-guide-de-bonnes-pratiques-faire-la-ville-avec-le-port_adherent.pdf
- DUCRUET, César (2008). Typologie mondiale des relations ville-port. *Cybergeo: European Journal of Geography* [Online], Space, Society, Territory, document 417. <http://journals.openedition.org/cybergeo/17332>
- BARIOL-MATHAIS, Brigitte (2021). Ports, villes et transition. FNAU Éditions Gallimard. Extrait : <https://fnau.org/wp-content/uploads/2021/10/extrait-point-fnau-13-1.pdf>
- DARRICAU, Maider (2025). Une interface ville-port plus perméable. Entretien avec Bruno Delsalle, directeur général de l'AIVP. *Urbanismen* n°443. <https://www.urbanisme.fr/bruits-de-ville/une-interface-ville-port-plus-permeable/>
- OECD/ITF (2017). Local Governments and Ports. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2017/05/local-governments-and-ports_3136b740/820a7ecb-en.pdf

- Hoyle, B. S. (1989). The port–city interface: Trends, problems and examples. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0016718589900262>
- Daamen, T. A. & De Vries, I. (2012). Governing the European port–city interface: institutional impacts on spatial projects between city and port. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692312000762>
- PIANC, EnviCom WG 178 (2020). Climate Change Adaptation Planning for Ports and Inland Waterways. <https://www.pianc.org/publication/climate-change-adaptation-planning-for-ports-and-inland-waterways-2/>
- World Bank (2025). Nature-Based Solutions for Ports: An Overview of NBS Implementation in Practice - Opportunities and Challenges. <https://hdl.handle.net/10986/43420>

