

PORTS DU RHIN SUPERIEUR – PROJECTION DES RISQUES CLIMATIQUES ET ENSEIGNEMENTS DU PROJET CRANE

Daniela Albiez, Jakob Hömberg, Dr Anna Klose, Dr Daniel Lückerath

Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS

Sommaire

1	INTRODUCTION	3
2	RISQUES CLIMATIQUES	6
3	RISQUES CLIMATIQUES POUR LES ELEMENTS DU SYSTEME	10
4	ÉLÉMENTS CRITIQUES DU SYSTÈME	14
5	ÉLÉMENTS DU SYSTEME NECESSITANT UNE INTERVENTION.....	15

1 Introduction

Le projet CRANE

Le changement climatique entraîne des défis croissants aux ports fluviaux du Rhin supérieur. Les phénomènes météorologiques extrêmes, les crues et les étiages, ainsi que les changements climatiques à long terme, affectent d'ores et déjà le bon fonctionnement et la résilience des infrastructures portuaires critiques. C'est dans ce contexte qu'a été lancé le projet **CRANE – Climate Resilience and Adaptation for Upper Rhine Ports**, afin de recenser systématiquement les risques climatiques pesant sur les principaux ports de la région et de créer des bases solides pour la planification de leur adaptation.

CRANE regroupe sept ports partenaires – **Bâle, Karlsruhe, Kehl, Ludwigshafen, Mannheim, Mulhouse et Strasbourg** – ainsi que des partenaires techniques et scientifiques spécialisés. **L'Institut Fraunhofer pour les systèmes d'analyse et d'information intelligents (IAIS)** est chargé du développement méthodologique et de la réalisation des analyses des risques climatiques. La collaboration étroite entre les exploitants portuaires et les instituts de recherche permet une évaluation solide et concrète des risques climatiques dans l'ensemble de la région du Rhin supérieur.



Le projet est cofinancé par le programme **Interreg Rhin supérieur** et complété par un **cofinancement suisse**. Le budget total s'élève à environ **1,4 million d'euros** et couvre la période de mise en œuvre **2024-2026**. Le caractère transfrontalier du projet reflète la forte interdépendance fonctionnelle des ports et favorise une adaptation coordonnée au niveau régional.

L'objectif de CRANE est (1) d'identifier les risques liés au climat pour les infrastructures portuaires, les processus et les systèmes naturels, (2) de développer une **méthodologie harmonisée** pour les ports fluviaux du Rhin supérieur, (3) d'évaluer et de hiérarchiser les risques, et (4) de jeter les bases de **stratégies d'adaptation et de résilience**. Les résultats doivent contribuer à garantir le bon fonctionnement à long terme des ports tout en renforçant la résilience des chaînes d'approvisionnement logistiques.

Bien que les ports fluviaux jouent un rôle central dans l'approvisionnement régional, il n'existait, avant le projet CRANE, **aucune méthode spécifique** permettant d'évaluer systématiquement les risques climatiques dans ces ports intérieurs. Il a donc fallu développer une approche méthodologique adaptée à leurs besoins spécifiques : la **complexité** des systèmes portuaires exigeait une démarche structurée et transparente ; le **manque de données disponibles** sur les dommages liés aux aléas climatiques a rendu nécessaire la génération de nouvelles connaissances à travers des ateliers et discussions entre experts ; parallèlement, la méthode devait favoriser le **développement d'une expertise interne** dans les ports et renforcer les **échanges entre les partenaires**. De plus, elle devait être applicable à l'échelle **transnationale** afin de créer une **base uniforme et compatible avec le cadre européen** pour les ports en Allemagne, en France et en Suisse.

Les projections climatiques

L'objectif du traitement des données climatiques dans le cadre du projet CRANE est de présenter les évolutions historiques ainsi que les projections des paramètres climatiques pertinents pour les sept ports du Rhin supérieur, afin de pouvoir en déduire les mesures d'adaptation possibles. Les indicateurs découlent des paramètres climatiques (température, précipitations) (fournis par le DWD) ainsi que de leurs effets sur l'hydrologie, les conditions de navigation et les propriétés de l'eau (fournis par la BfG).

Quelles sont les périodes et les scénarios climatiques considérés ?

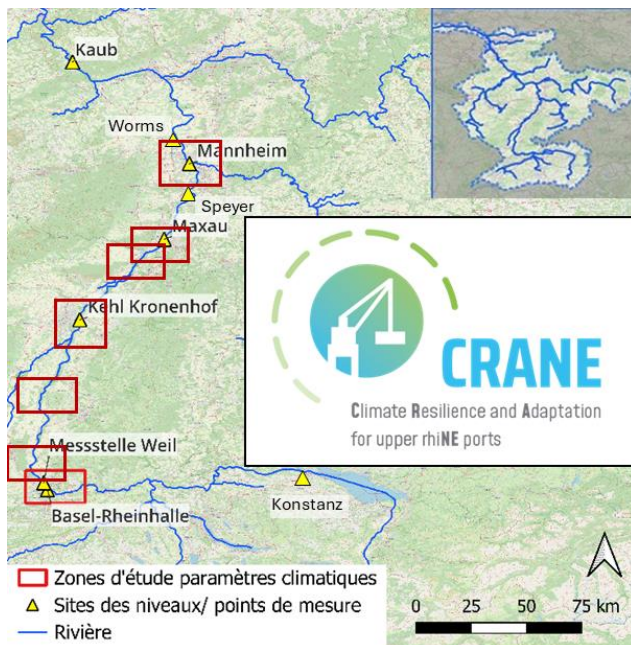
Cinq périodes sont considérées dans la fiche descriptive : trois dans le **passé**, deux dans le **futur**. Les données du passé se basent sur des calculs (DWD) ou des données d'observation (BfG). Les données pour le futur se basent sur des projections climatiques.

- **1971-2000 Passé** → 1971-2000 est la période de référence, c'est-à-dire que les modifications indiquées dans les tableaux se rapportent à cette période.
- **1981-2010 Passé**
- **1991-2020 Présent**
- **2031-2060 Futur proche**
- **2071-2100 Futur lointain**

Les projections climatiques sont basées sur le scénario d'émissions RCP8.5, qui suppose une augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans le futur. Les projections climatiques comportent toujours des incertitudes. Pour les représenter, plusieurs simulations sont calculées. La fourchette des résultats est saisie sous la forme d'un centile relativement bas (15), d'un centile relativement élevé (85) et (pour les paramètres hydrologiques) du résultat central de la simulation (centile 50).

Que sont les projections climatiques et les scénarios d'émissions ?

Une projection climatique est la réaction simulée du système climatique à un scénario d'émissions futures de gaz à effet de serre et d'aérosols, déduits à l'aide de modèles climatiques (scénarios d'émissions). Ils se basent sur des hypothèses concernant les développements socio-économiques et technologiques futurs, qui pourraient ou non se produire (traduit d'après GIEC, 2018). Les incertitudes dans les projections climatiques sont dues, entre autres, à la complexité et à la variabilité naturelle du système climatique ainsi qu'à l'incertitude concernant les évolutions susmentionnées des émissions, de la socio-économie, etc. (DWD, n.d. b; GIEC, 2014).



Lien géographique

Les indicateurs relatifs aux influences climatiques dans les différents sites portuaires dans le Rhin supérieur se réfèrent aux rectangles rouges, c'est-à-dire qu'il s'agit de valeurs moyennes pour ces extraits.

Les indicateurs relatifs à l'hydrologie, aux conditions de navigation et aux propriétés de l'eau se réfèrent aux principales échelles le long du Rhin et intègrent les processus à l'échelle du bassin du Rhin.

¹ Le choix des périodes et du scénario est basé sur des recommandations et des conventions (Die Bundesregierung, 2008 ; UBA, 2023) ainsi que sur les besoins du projet et la disponibilité des données.

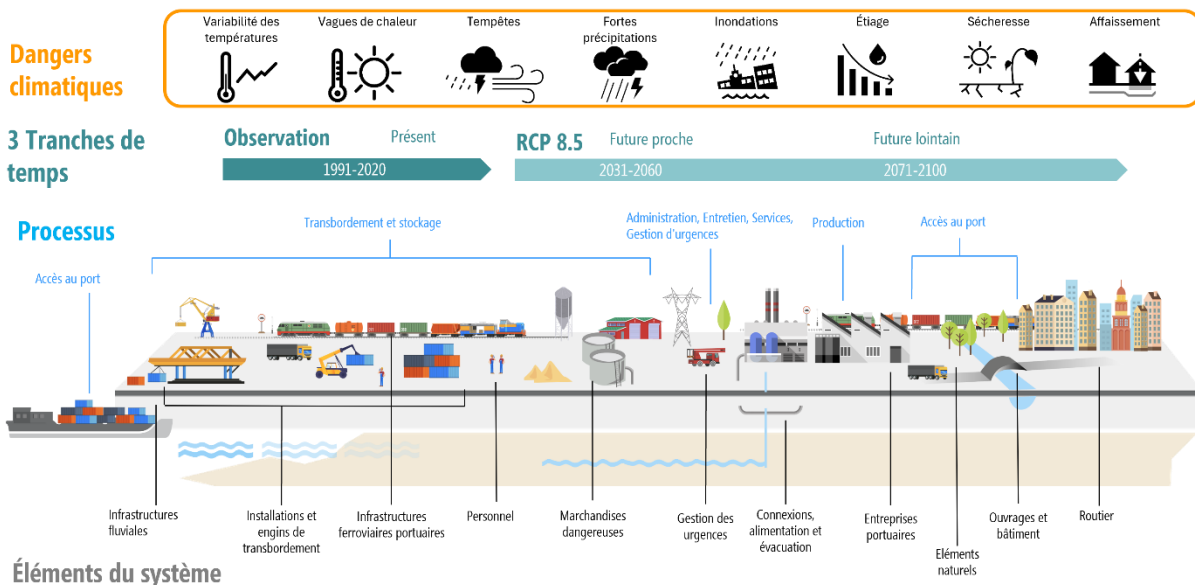
*Bases de données de la carte : Carte de base : © OpenStreetMap (openstreetmap.org, opendatacommons.org); Flüsse: GRDC (2020): GRDC Major River Basins. Global Runoff Data Centre. 2nd, rev. ed. Koblenz: Federal Institute of Hydrology (BfG); Emplacements des échelles limnimétriques : Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS); <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/start>

L'objet du présent rapport

Ce rapport présente une synthèse comparative des résultats des analyses des risques climatiques pour les sept ports participant au projet CRANE. Ces analyses ont été élaborées conjointement par le Fraunhofer IAIS et le personnel des ports participants dans le cadre du projet CRANE. L'objectif de ces analyses est de fournir une base pour la planification des mesures d'adaptation. Le résultat est une hiérarchisation interne au port des éléments du système à prendre en compte dans la planification de l'adaptation. Il s'agit donc d'une **étude indicative** et non d'une base de planification technique pour des travaux de construction. La méthode repose sur **l'expertise locale** relative au port, à ses éléments du système et à ses processus, qui a été apportée par le personnel du port et recueillie de manière structurée au cours du processus. Le résultat reflète ainsi très bien les conditions locales.

Les éléments suivants ont été pris en compte dans l'étude :

- Jusqu'à **8 risques climatiques** (variabilité des températures, vague de chaleur, sécheresse et stress hydrique, étiage, crues, fortes précipitations, tempêtes, affaissements). Tous les risques climatiques n'ont pas été considérés comme pertinents dans tous les ports.
- **3 périodes** (présent 1991-2020, avenir proche 2031-2060, avenir lointain 2071-2100).
- Les ports ont été décrits comme des systèmes complexes, composés de
 - Jusqu'à **60 éléments fonctionnels du système (ES)** relevant des domaines des infrastructures, des équipements et du personnel (tous les ES ne sont pas présents dans tous les ports), regroupés en 12 groupes (le groupe « connexions aux territoires » comprend par exemple les ES « voies navigables », « réseau ferroviaire (en dehors de la zone portuaire) » et « routes et ponts publics ») et
 - jusqu'à **18 processus spécifiques aux ports** dans les domaines de l'accès, du transbordement et du stockage, de la production et des processus transversaux (tous les processus ne sont pas présents dans tous les ports).



2 Risques climatiques

Sur la base des données du service météorologique allemand (Deutscher Wetterdienst DWD), les tendances climatiques sont analysées pour les sites des sept ports CRANE du Rhin supérieur et résumées dans des fiches climatiques par port. La comparaison des paramètres climatiques des différents sites fait apparaître **des tendances similaires** dans la plupart des cas.

Chaleur

Par exemple, le **nombre de jours chauds** a déjà nettement augmenté sur tous les sites depuis la période de référence (1971-2000) jusqu'à aujourd'hui (1991-2020), et une augmentation plus loin est à prévoir (Illustration1). La situation de départ varie légèrement : Bâle enregistre actuellement le moins de journées caniculaires, mais l'augmentation y est tout aussi marquée que sur les autres sites.

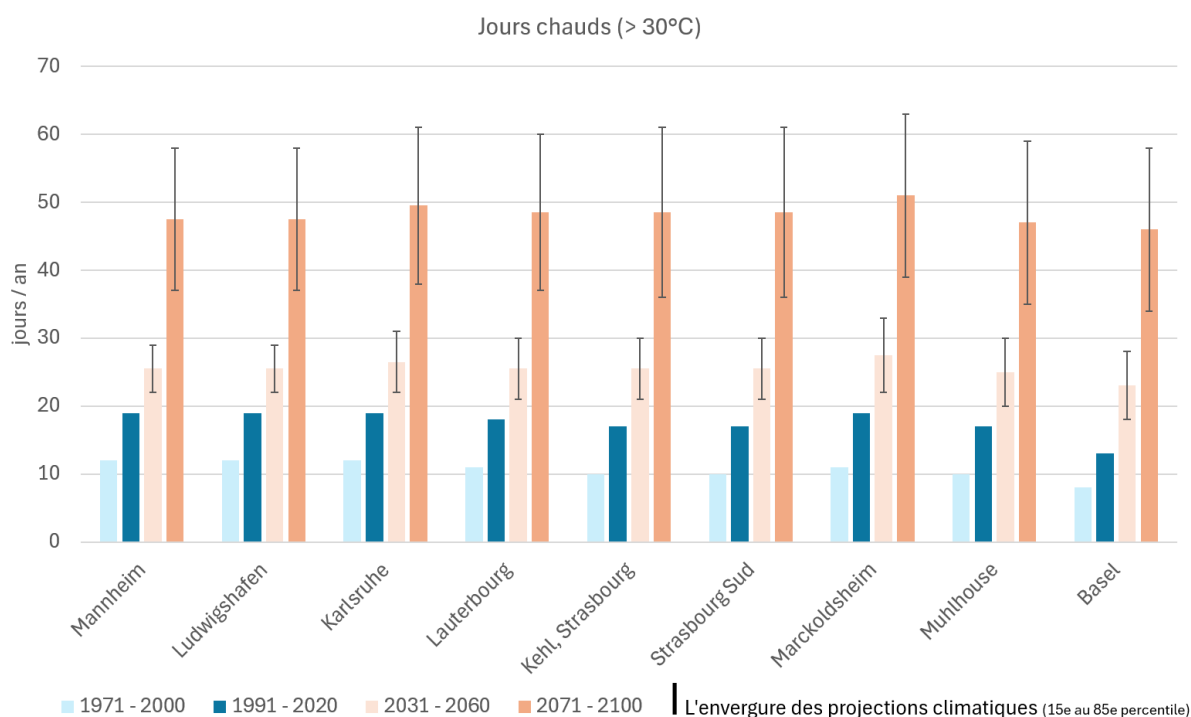


Illustration1 : nombre de journées de forte chaleur dans les sites portuaires – données observées (1971- 2000 et 1991-2020) et projections (2031-2060 et 2071-2100).

Sécheresse

Le tableau est plus contrasté en ce qui concerne la sécheresse et le stress hydrique (indicateur : **nombre de jours sans précipitations par an**, Illustration2 montre l'écart par rapport aux valeurs présentes) : aucune tendance claire ne se dégage pour les trois sites les plus au nord, tandis que les autres affichent une augmentation modérée, la plus marquée à Bâle (augmentation de 10 jours d'ici la fin du siècle).

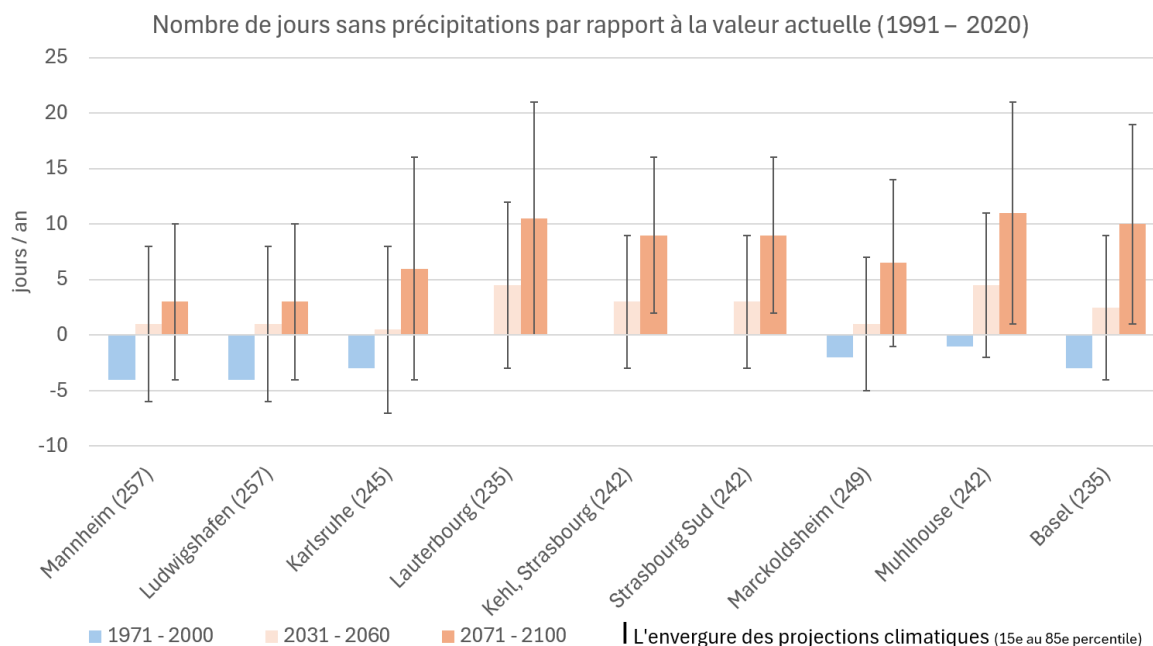


Illustration2 : écart du nombre de jours sans précipitations par rapport à la valeur actuelle (1991 – 2020) ; les chiffres indiqués derrière les sites correspondent à la valeur actuelle en jours/an.

Crues

Les différentes stations de mesure situées le long du Rhin supérieur et celle de Kaub montrent une nette augmentation du **débit en période de crue** (Illustration3). Les échelles de Worms, Spire et Maxau présentent un écart plus important au milieu qu'à la fin du siècle, ce qui s'explique par la contribution décroissante des glaciers alpins au débit à la fin du siècle.

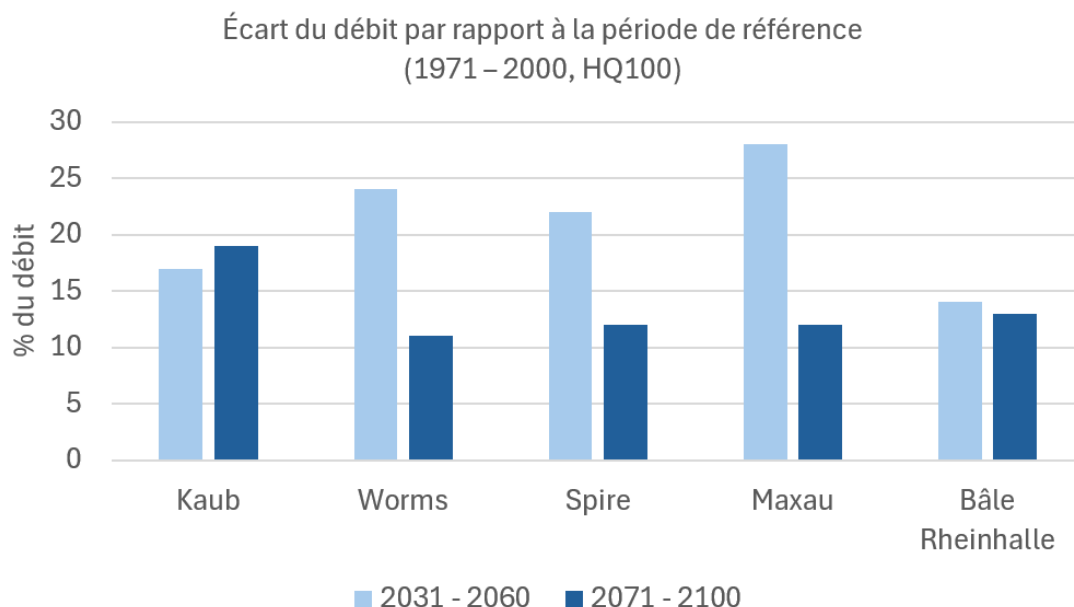


Illustration3 : débit lors d'une crue centennale – écart du débit par rapport à la période de référence (1971 – 2000) en %.

Étiage

Une nette diminution du **débit en période d'étiage** est observée en été pour toutes les stations (Illustration4).

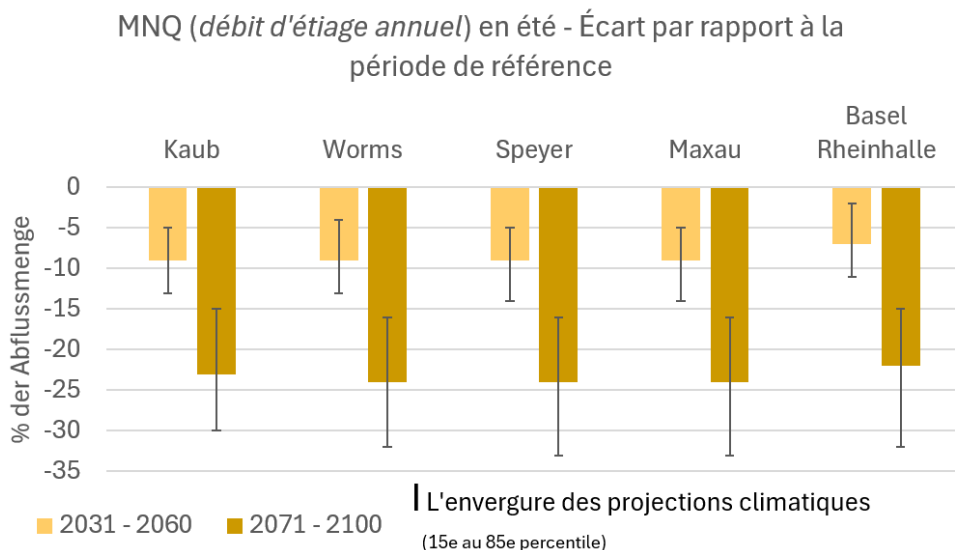


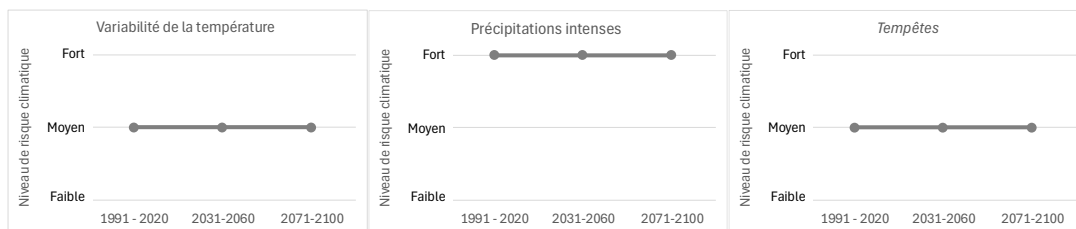
Illustration4 : Débit moyen d'étiage en été – écart du débit par rapport à la période de référence (1971–2000) en %.

Tendances des dangers climatiques

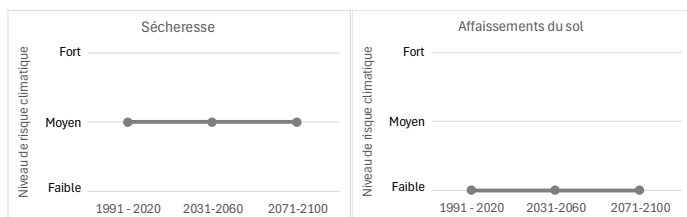
Sur la base de ces données climatiques, des tendances ont été identifiées pour les sept ports et utilisées pour l'analyse des risques climatiques :

Les projections climatiques ne font apparaître **aucune tendance claire** concernant les aléas liés à la variabilité des températures, aux fortes précipitations et aux tempêtes pour l'ensemble des sites portuaires, ni concernant les aléas liés à la sécheresse et au stress hydrique pour les trois sites les plus au nord.

Tous les sites



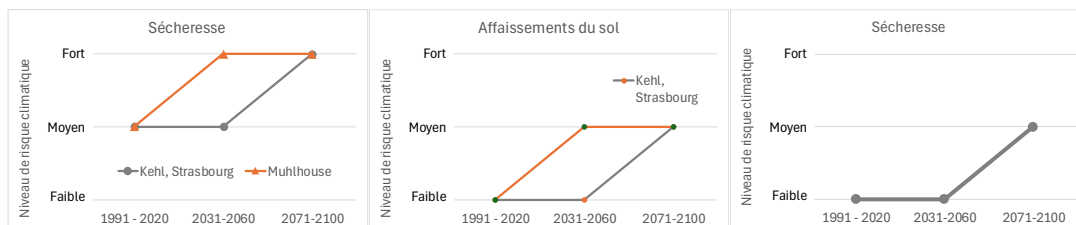
Mannheim, Ludwigshafen, Karlsruhe



Une augmentation modérée est observée pour les risques climatiques de sécheresse et de stress hydrique et d'affaissement à Kehl, Strasbourg et Mulhouse.

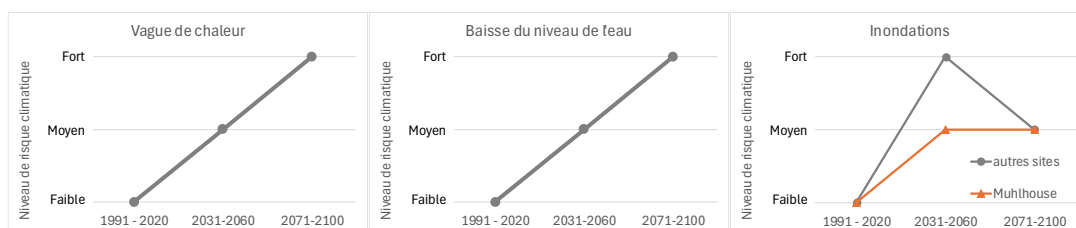
Kehl, Strasbourg, Mulhouse

Bâle

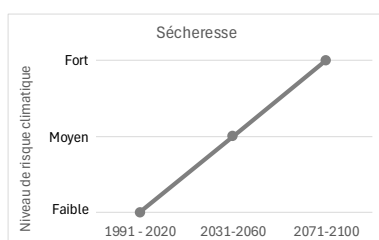


Une augmentation significative est observée pour les risques climatiques suivants : vagues de chaleur, étiage, crues, ainsi que pour la sécheresse et le stress hydrique à Bâle.

Tous les sites



Bâle



3 Risques climatiques pour les éléments du système

Les risques climatiques pour les éléments du système résultent de l'ampleur du risque climatique et de leur vulnérabilité face à ce risque.

$$\boxed{\text{Risque climatique}} = \boxed{\text{Danger climatique}} \times \boxed{\text{Vulnérabilité}}$$

L'ampleur des risques climatiques a été déduite à partir de paramètres climatiques (cf. chapitre 2). La vulnérabilité des éléments du système face aux différents risques climatiques a été évaluée lors d'ateliers organisés en collaboration avec les experts des ports.

Précision préalable : l'objectif de l'analyse des risques climatiques n'est pas de comparer les ports entre eux, mais de hiérarchiser les éléments du système au sein des ports en vue de la planification de l'adaptation. L'évaluation des vulnérabilités étant qualitative et fondée sur l'expertise locale des spécialistes, elle n'est comparable que dans une mesure limitée.

Il apparaît néanmoins que **les principaux risques climatiques pour la plupart des ports sont les fortes précipitations, les vagues de chaleur et les inondations**, car ils entraînent un risque haut pour la plupart des éléments du système à un moment ou à un autre (Illustration 5). Les tempêtes constituent également un risque important dans certains cas, tandis que la baisse du niveau de l'eau, la sécheresse et l'affaissement entraînent rarement, voire jamais, un risque haut dans les zones portuaires.

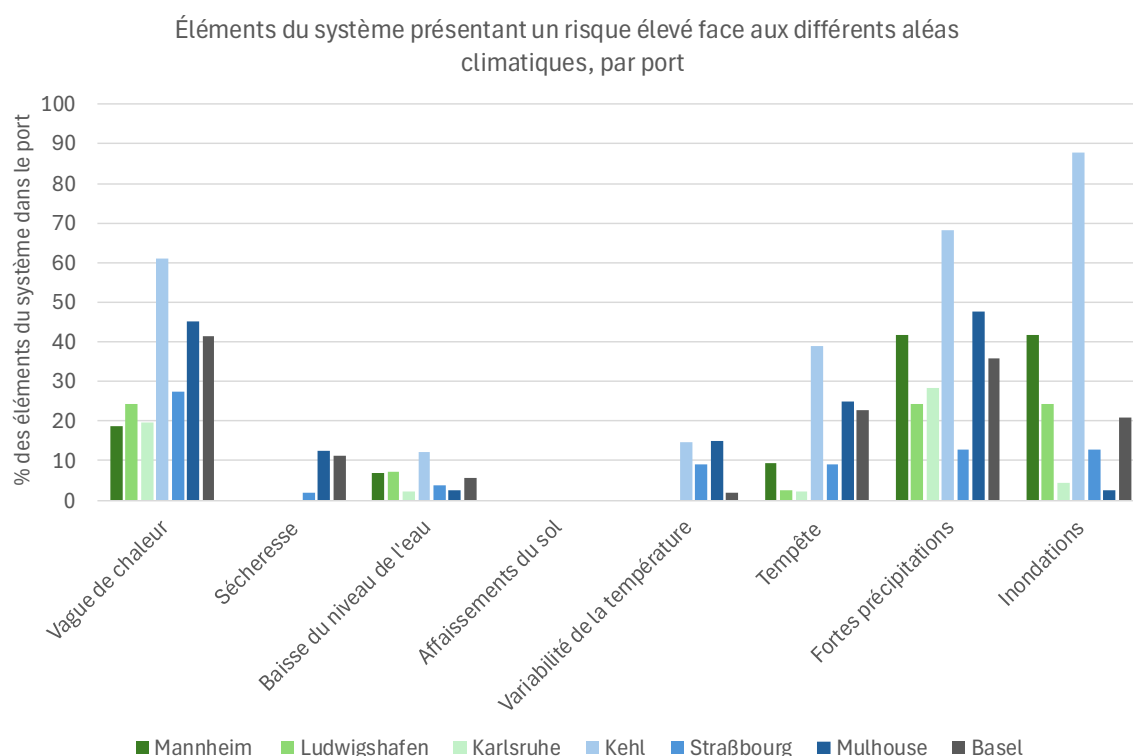


Illustration 5 : pourcentage des éléments du système par port exposés à un risque haut face aux différents risques climatiques.

Différences locales

L'exemple du risque d'inondation permet d'illustrer les **différences locales** entre les ports. Les trois ports colorés en vert dans la figure [Illustration 5](#) se trouvent dans la partie non régulée du Rhin supérieur (Mannheim, Ludwigshafen, Karlsruhe). Comme on pouvait s'y attendre, **Mannheim** et **Ludwigshafen** présentent donc un risque d'inondation plus élevé que les ports situés dans la zone régulée (à l'exception de Kehl). **Karlsruhe**, en revanche, est protégée par sa porte de garde ; le risque d'inondation y est faible. Le risque dans le port de **Kehl** est plus élevé pour deux raisons : d'une part, les experts du port ont systématiquement évalué le risque de manière prudente (pour presque tous les risques climatiques, Kehl a identifié la plupart des ES comme présentant un risque élevé). D'autre part, le port de Kehl est situé dans le triangle formé par le Rhin et la Kinzig, de sorte qu'en cas de crue, deux cours d'eau contribuent au risque. Selon les experts du port, le danger représenté par la Kinzig est plus élevé que celui du Rhin régulé. **Strasbourg** et **Mulhouse** présentent, comme on pouvait s'y attendre, de faibles risques d'inondation en raison de leur situation sur la partie régulée du Rhin supérieur. À **Bâle**, les experts ont décrit que, par exemple, certaines parties du réseau ferroviaire peuvent être inondées ou que la hauteur libre sous les ponts dans la zone urbaine est limitée, ce qui entraîne un risque accru. Cet exemple montre clairement que les conditions locales, telles que l'emplacement des éléments du système, ont une forte influence sur le risque.

Les quatre principaux dangers climatiques et leur impact sur les éléments du système

Si l'on examine quels groupes d'éléments du système sont touchés par les quatre risques climatiques les plus marqués, on constate que les groupes « **ouvrages et bâtiments** », « **installations et engins de transbordement** » ainsi que « **infrastructures ferroviaires portuaires** » sont les plus touchés ([Illustration 6](#) ; les barres indiquent le nombre d'éléments du système exposés à un risque haut (rouge foncé : présent, orange : avenir proche, rouge clair : avenir lointain, gris : aucun risque)).

Ces schémas de risque sont similaires dans tous les ports, mais il existe des **différences locales** notables dans certains cas particuliers. Par exemple, à Mannheim, aucun risque d'inondation n'est constaté pour les infrastructures ferroviaires portuaires, tandis qu'à Ludwigshafen, la moitié des éléments du système (ES) du groupe est concernée par des inondations. Cela s'explique par la situation de certaines parties des infrastructures ferroviaires portuaires de Ludwigshafen dans la zone inondable.



Tempête	Inondations
Les groupes d'infrastructures portuaires les plus touchés sont les installations et engins de transbordement (par exemple, les grues peuvent subir des ruptures de matériaux) et les infrastructures ferroviaires portuaires (les arbres tombés peuvent bloquer les voies et sectionner les caténaires), ainsi que les ouvrages et bâtiments (les toitures peuvent être endommagées et des éléments de construction se détacher).	Les groupes d'éléments du système les plus touchés sont les ouvrages et bâtiments (l'eau peut s'infiltrer dans les bâtiments, les sous-sols et les entrepôts), les installations et engins de transbordement (certains se trouvent dans des zones inondables ; par exemple, les grues ne peuvent pas fonctionner ou les grosses machines et les marchandises doivent être sécurisées ou évacuées) et les infrastructures ferroviaires portuaires (les voies peuvent être inondées et les systèmes de signalisation perturbés).

Illustration6 : groupes d'éléments du système touchés par les quatre principaux risques climatiques (tous les ports)

4 Éléments critiques du système

Le risque climatique pesant sur les éléments du système ne permet pas à lui seul de déterminer dans quelle mesure les activités et les services portuaires seraient affectés par une défaillance de ces éléments. À cette fin, les experts des ports ont également évalué quels éléments du système sont critiques pour quelles activités portuaires (processus) et dans quelle mesure.

L'évaluation de la criticité des éléments du système fait apparaître des différences marquées entre les ports, en fonction des conditions locales. Ainsi, dans un port, les ponts revêtent une importance capitale, alors qu'ils ne jouent aucun rôle dans d'autres ports.

Si l'on examine les groupes d'éléments du système jugés critiques par les ports, les Connexions aux territoires retiennent particulièrement l'attention (Illustration7). Six ports sur huit la considèrent comme particulièrement critique, et l'élément du système « voie navigable du Rhin » figurant dans ce groupe est systématiquement classé comme critique.

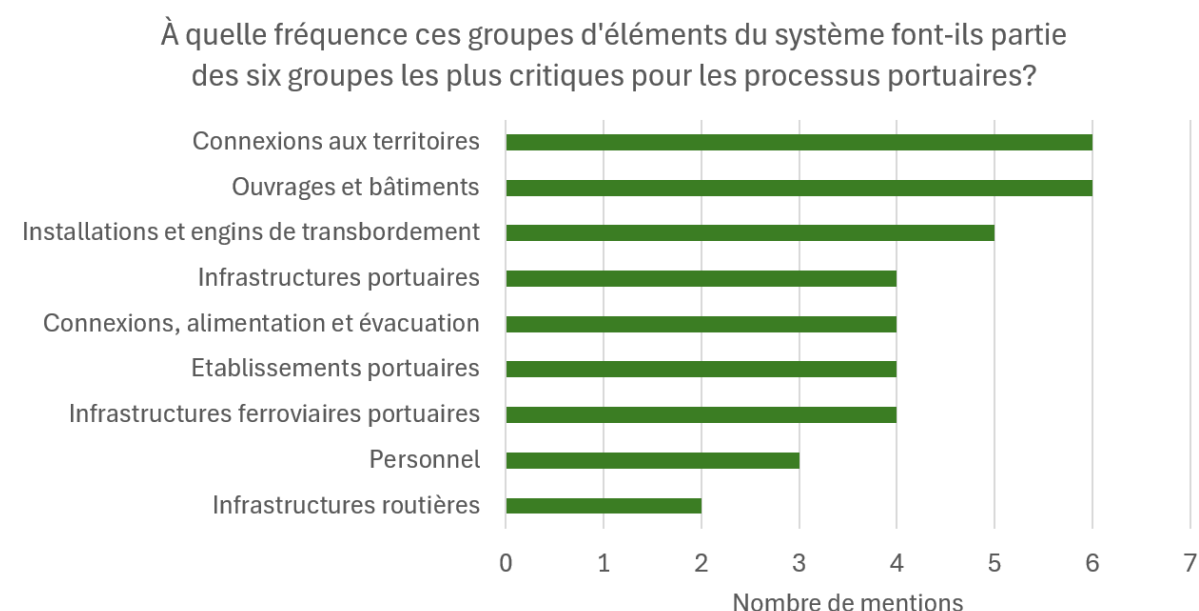


Illustration7 : Groupes critiques d'éléments du système (tous les ports ; les barres indiquent par combien de ports les groupes d'éléments du système ont été cités parmi les six groupes les plus critiques).

L'exemple des connexions aux territoires montre clairement pourquoi la criticité des processus constitue un **deuxième niveau d'analyse des risques** d'une importance fondamentale. Sur la base des risques pesant sur les éléments du système, d'autres groupes d'éléments du système (« ouvrages et bâtiments », « installations et engins de transbordement » ainsi que « infrastructures ferroviaires portuaires ») sont exposés aux risques les plus hauts (Illustration6). Le risque climatique « étiage » ne figure pas non plus parmi les principaux risques climatiques (Illustration5), mais revêt une importance capitale pour le Rhin. En raison de la criticité haute du Rhin en particulier pour les processus portuaires (Illustration7) et du risque élevé lié à la baisse des niveaux d'eau, il est toutefois recommandé de donner la priorité à cet élément du système dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.

5 Éléments du système nécessitant une intervention

Le besoin d'action le plus urgent se manifeste là où des éléments du système sont exposés à un risque climatique haut et sont en même temps indispensables à au moins un processus dans le port. Cette combinaison de risque haut et de très grande importance pour le processus conduit au niveau d'alerte « très élevé ».

Les éléments du système prioritaires varient considérablement d'un port à l'autre (Tableau1).

Tableau1 : Les trois éléments du système présentant la priorité la plus haute pour la planification de l'adaptation dans les différents ports

Port	Quels sont les domaines à adapter en priorité ?	Face à quel risque climatique ?	Afin de préserver quels processus ?	
Mannheim	Ponts	Vague de chaleur, inondations	Arrivée et départ	...par bateau, train
			Transbordement et stockage	...de voitures / machines / véhicules
	Personnel	Vague de chaleur, fortes précipitations, inondations	Processus transversaux	...gestion d'urgences, entretien
	Routes et voies d'accès	Fortes précipitations, inondations	Accès et sortie	...par camions
Processus transversaux			...gestion d'urgences	
Ludwigshafen	Murs de quai	Étiage	Arrivée et départ	...par bateau
			Transbordement et stockage	...de colis lourds, de marchandises dangereuses, de voitures/machines/véhicules
	Hangar à bateaux flottant, ponton	Fortes précipitations	Arrivée et départ	...par bateau
			Plus loin	...croisière rhénane & bateau à passagers
	Voies navigables (Rhin)	Inondations, étiage	Arrivée et départ	...en bateau, en train
			Plus loin	...croisière rhénane & bateau à passagers
Karlsruhe	Portes de garde et écluses	Vague de chaleur, fortes précipitations, inondations	Transbordement et stockage	...de marchandises conteneurisées ... dans des hangars, des silos, des entrepôts à ciel ouvert
			Arrivée et départ	... par bateau
			Processus transversaux	... transformation, affinage, production ; croisière rhénane & bateau à passagers
	Voies navigables (Rhin)	Vague de chaleur, inondations, étiage	Arrivée et départ	... par bateau
Kehl	Voies navigables (Rhin)	Vague de chaleur, tempête, fortes précipitations, inondations, étiage	Arrivée et départ	... par bateau
			Transbordement et stockage	... de marchandises conteneurisées, de colis lourds ... en vrac, dans des hangars, des silos
	Routes publiques et ponts	Vague de chaleur, tempête, fortes précipitations, inondations	Accès et sortie	... par camions
			Transbordement et stockage	... de marchandises conteneurisées, de colis lourds ... en vrac, dans des hangars, des silos
	Réseau ferroviaire (en dehors de la zone portuaire)	Variabilité des températures, vague de chaleur, inondations	Arrivée et départ	... par train
			Transbordement et stockage	... de marchandises conteneurisées, de colis lourds

Port	Quels sont les domaines à adapter en priorité ?	Face à quel risque climatique ?	Afin de préserver quels processus ?	
				... en vrac, dans des hangars, des silos
Strasbourg	Personnel	Vague de chaleur, fortes précipitations	Arrivée et départ	... tous
			Transbordement et stockage	... tous
			Processus transversaux	... tout
			Autres	... tous
	Voies et aiguillages	Vague de chaleur	Arrivée et départ	... par le train
			Transbordement et stockage	... de marchandises conteneurisées, de colis lourds, de voitures/machines/véhicules ... dans des silos
Mulhouse	Terminaux à conteneurs	Vague de chaleur, fortes précipitations	Arrivée et départ	... par train
			Transbordement et stockage	... de marchandises conteneurisées, de colis lourds, de voitures/machines/véhicules ... dans des silos
	Voies navigables (Rhin)	Étiage	Arrivée et départ	... par bateau
	Voies et aiguillages	Variabilité des températures, vague de chaleur, tempête, fortes précipitations, sécheresse et stress hydrique	Arrivée et départ	... en train
Bâle	Personnel	Variabilité des températures, vague de chaleur, tempête, fortes précipitations	Aller et retour	... par bateau, train, camions
			Processus transversaux	... administration & organisation, gestion d'urgences, entretien, services
			Plus loin	... croisière rhénane & bateau à passagers
	Grues	Vague de chaleur, tempête	Transbordement et stockage	... de marchandises conteneurisées, de colis lourds et de marchandises dangereuses ... en vrac, dans des hangars, des silos
	Marchandise entreposée, conteneurs et silos	Vague de chaleur, tempête	Transbordement et stockage	... de marchandises réfrigérées, de marchandises conteneurisées, de colis lourds, de marchandises dangereuses ... en vrac, dans des hangars, des silos