



HAL
open science

Les aléas et les adaptations logistiques de la navigation rhénane face au changement climatique

Antoine Beyer

► **To cite this version:**

Antoine Beyer. Les aléas et les adaptations logistiques de la navigation rhénane face au changement climatique. Bulletin de l'Association de géographes français, 2023, 100 (3), pp.389-407. 10.4000/bagf.11484 . halshs-04413207

HAL Id: halshs-04413207

<https://shs.hal.science/halshs-04413207>

Submitted on 24 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les aléas et les adaptations logistiques de la navigation rhénane face au changement climatique Hazards and logistical adaptation to climate change in the Rhine navigation

Antoine BEYER, professeur de géographie Cergy Paris Université en détachement, Institut Paris Region, 15 rue Falguière 75015 Paris – associé UMR Matris CYU
antoine.beyer@institutparisregion.fr
Adresse perso : 38 rue de Beauvais 95420 Magny-en-Vexin -Tél. 06 67 78 93 06

Résumé

Si des événements hydrologiques majeurs n'ont cessé de ponctuer l'histoire du Rhin, la croissance de leur fréquence et l'importante de leur amplitude inquiètent aujourd'hui les pouvoirs publics, les riverains et les industriels. La navigation fluviale, vecteur essentiel du développement industriel du bassin rhénan, est particulièrement touchée par ces évolutions. Les experts hydrologues y voient les conséquences du réchauffement climatique, appelées à s'amplifier dans les années à venir. Se pose dès lors la question de l'accompagnement et éventuellement de la prévention sur le court et moyen terme des mutations du régime fluvial sur le transport rhénan. Quelles seront les nouvelles conditions de navigabilité et réponses à apporter à ces mutations, d'un point de vue technique (aménagements hydrologiques) et organisationnel (structure de la flotte, ingénierie nautique et complémentarités modales) ?

Mots-clés : Rhin, Allemagne, navigation fluviale, changement climatique, basses-eaux, transport de fret

Summary

Major hydrological hazards always punctuated the Rhine history. Their frequencies and amplitude are becoming a major concern to the public authorities, residents, and riparian industry. River navigation, which has been an essential tool of industrial development in the Rhine basin, is particularly affected by such a development. Hydrological experts consider it as consequence of global warming, which is likely to increase in the near future. The question is then how to accompany and possibly prevent the changes in the Rhine regime in short and medium term. What will be the new conditions of navigability and what answers should be addressed from a technical (hydrological developments) and managerial (fleet structure, modal alternatives) point of view?

Keywords: Rhine, Germany, inland navigation, climate change, low water, freight transport

Introduction

Le Rhin est l'une des voies de navigation intérieure les plus fréquentées du monde. Il draine le cœur industriel et urbain de l'Europe et concentre de ce fait 80% des trafics fluviaux de l'Union européenne, soit annuellement 200 millions de tonnes de marchandises au droit de la frontière germano-néerlandaise. L'artère rhénane offre plus de 900 kilomètres de voies à grand gabarit, autorisant la circulation d'unités de 1500 tonnes jusqu'à Bâle¹, un potentiel de transport sans comparaison avec les offres routières ou ferroviaire. Le trafic y est intense avec quotidiennement autour de 600 bateaux à la frontière germano-néerlandaise, 400 à Cologne, 300 à Mayence à la confluence de la Moselle et 200 à Karlsruhe [CCNR, 2022.2]. Le mode fluvial présente en outre l'avantage d'un impact environnemental réduit et susceptible d'être sensiblement amélioré avec la substitution des hydrocarbures et la décarbonation des automoteurs. Si l'on se reporte aux données collectées en 2015 pour l'ensemble du corridor européen « Rhine-Alpine », c'est-à-dire le prolongement de la vallée du Rhin proprement dite avec les traversées et le débouchées en Italie du Nord, sur les 246,7 Mt transportées, 59,4 Mt (24%) l'étaient par le rail, 61,9 Mt (25%) par la route et 125,4 Mt (51%) par la voie d'eau, Le poids du transport fluvial dans la partie septentrionale de l'axe est donc largement supérieur à la moitié des trafics (TRT *et al.*, 2019).

Toutefois, ces dernières années, des variations de niveaux ont profondément perturbé les trafics rhénans multipliant les interruptions temporaires de navigation. Les étiages de 2018 et 2022 ont été particulièrement sévères, dévoilant brutalement la fragilité de l'offre fluviale. A l'inverse les pluies torrentielles d'hiver ont conduit à une série d'importantes crues (1993, 1995, 2018, 2021) associée à des inondations destructrices sur le cours d'eau principal ou ses affluents. Des images saisissantes et largement relayée dans les medias ont

1 A titre de repère, un automoteur rhénan, de 110 m de long pour 11m de large a un emport de 3000 tonnes. Chargé à plein, il exige un tirant d'eau minimal de 3m.

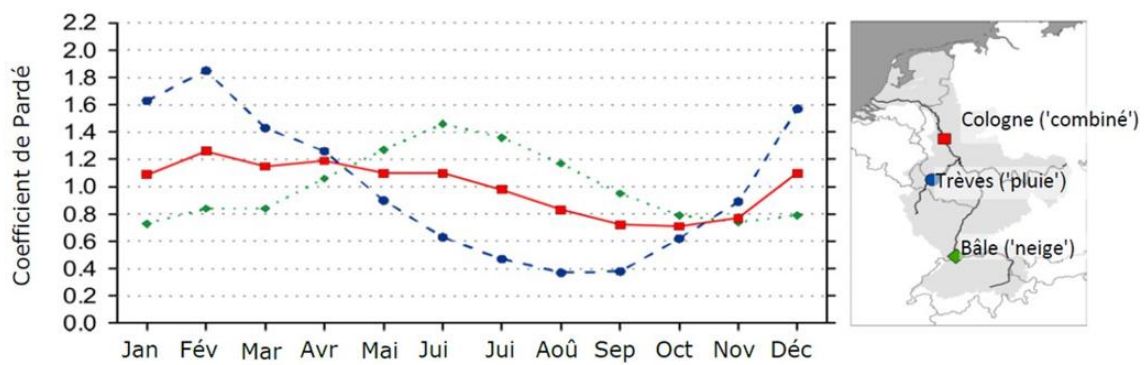
marqué l'opinion publique et conduit les industriels à répondre hâtivement à des transports de substitution. Cette préoccupante perspective impacte tout particulièrement la navigabilité du Rhin parce qu'une intermittence croissante questionne l'intégration de la voie d'eau rhénane dans les chaînes logistiques modernes. Elle sape deux de ses avantages concurrentiels que sont la capacité d'emport unitaire et la régularité. De cette offre, dépendent étroitement les pôles d'industrie lourde de la chimie, des secteurs de l'énergie, de la métallurgie, mais aussi et de plus en plus l'ensemble des secteurs productifs avec le fort développement des services de conteneurs qui irriguent un très vaste arrière-pays ainsi que les grands paquebots touristiques. L'affaiblissement durable de l'offre fluviale sur le Rhin ne pourrait être très partiellement compensé par les offres routières et ferroviaires moins efficaces et surtout elles-mêmes déjà soumises à une forte saturation et à de possibles disruptions.

Un réseau d'institutions internationales du Rhin, ainsi de grandes administrations nationales des pays riverains (Suisse, France, Allemagne) épaulées par de nombreuses structures de recherche et de bureaux d'ingénierie ont engagé une réflexion sur les effets d'un changement climatique sur la navigabilité du Rhin. Leurs travaux seront largement convoqués pour étayer notre démonstration. Celle-ci s'organisera de la manière suivante : dans une première partie, on reviendra sur les causes et la mesure de l'ampleur des changements en cours qui, bien que réels seront à nuancer. Une seconde partie s'attachera plus spécifiquement à mesurer les conséquences économiques et organisationnelles des aléas hydrographiques du transport fluvial rhénan. La troisième partie reviendra sur les politiques à suivre et les mesures concrètes envisagées à la fois par les autorités publiques en charge de la navigabilité et par les opérateurs de transport pour adapter les transports aux nouvelles conditions d'exploitation.

1. Des irrégularités et des amplitudes croissantes du débit du Rhin

Comme la plupart des fleuves, le Rhin est naturellement soumis à des variations à la fois saisonnières et cycliques. Originaire des Alpes, il est caractérisé dans la partie supérieure de son cours par un régime nival caractérisé par un pic lors de la fonte des neiges. En aval, après les confluences du Neckar et du Main, son débit est de plus en plus marqué par le régime pluvial et de bassins-versants alimentés par les massifs hercyniens. De ce fait, le Rhin enregistre deux maxima (juin-juillet et décembre-mars) (Fig.1). Les grandes crues de type « estivales helvétiques » ont caractérisé le bassin supérieur et moyen du Rhin jusqu'à la canalisation du fleuve au XIXe siècle. Avec les aménagements successifs du fleuve, les grandes crues de type « océanique d'hiver, ont alors eu tendance à s'amplifier en aval. Le corsettement du lit majeur a favorisé la propagation de l'onde de crue en aval et sa puissance a été renforcée par l'imperméabilisation des sols qui en accentue le volume et la vitesse de ruissellement à l'échelle de chaque bassin versant.

Figure 1. Régimes de précipitation et variation annuel de débit du le Rhin [Brahmer & al., 2018, p.18]



Coefficient de Pardé = Rapport du débit mensuel moyen au débit interannuel moyen.

Ces dernières années ont été marquées par des phénomènes exceptionnels et prolongés de basses eaux (en 2018 et à nouveau en 2022), en contraste avec le régime plus régulier des décennies précédentes (Fig.2). Il faut ici en chercher la cause principale dans le phénomène de réchauffement climatique global [Klein, Meißner 2016]. En effet, à l'échelle du bassin du Rhin, les conséquences d'un déficit hydrique estival, précoce et prolongé, est à la fois lié à la réduction des précipitations et à leur répartition moins équilibrée. Le réchauffement atmosphérique global réduit la capacité de rétention des précipitations du fait de la fonte précoce de la neige et de la glace couplé au recul du pergélisol et du déplacement de la limite des chutes de neige, réduisant d'autant le volume d'eau stockée sous forme solide et accroissant l'évaporation. Il est acquis que l'apport d'eau de fonte qui soutient les débits du Rhin en été s'amenuise [Stahl & al., 2022]. L'attrition puis la disparition définitive des glaciers alpins marquera la fin du lissage annuel des débits du Rhin, creusant d'autant les forts étiages d'été et d'automne. Symétriquement le bassin amont accroît l'ampleur des crues d'hiver en renforçant son caractère pluvial. Ainsi, de nivoglacière, le débit du Rhin amont passerait à pluvio-nival.

Figure 2. Les variations Rhin à Cologne (à droite en septembre 2018, à gauche en janvier 2018). Source Pinterest



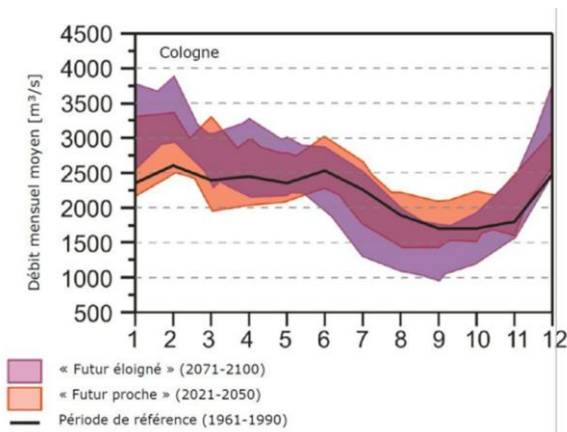
A l'été 2022, la réduction de l'écoulement de surface a combiné la faiblesse des pluies, une plus forte évaporation et une sollicitation végétale accrue qui conduisent à l'abaissement général du niveau des nappes phréatiques. La conséquence a été particulièrement visible avec l'image des lits du Rhin et de ses affluents asséchés. Cet épisode d'intense stress hydrique a eu des impacts notables sur l'ensemble des écosystèmes. Les effets sur les activités humaines liées au Rhin ont aussi été durement impactés notamment la navigation qui a été limitée, puis suspendue bouleversant l'approvisionnement d'importants sites industriels et énergétiques. De tels effets étaient anticipés. La CCNR² avait ainsi engagé des réflexions sur les effets du changement climatique pour la navigation rhénane à travers une série de rapports (2008, 2009 et 2011). La dernière expertise d'ampleur diffusée en 2019, concordante avec le GIEC³ et les prévisions de la Commission pour l'hydrologie du Rhin (« *Rheinblick 2050* ») et de la Commission internationale pour la protection du Rhin (« *Stratégie d'adaptation au changement climatique dans le DHI⁴ Rhin* ») faisait encore état d'une évolution qui devait s'amplifier après 2050 en accentuant progressivement les phénomènes de basses et hautes eaux (Fig.3). Il était alors estimé que de profondes modifications du régime hydrique interviendraient après cette date, sous l'effet conjugué de l'augmentation des précipitations hivernales et de l'accroissement des sécheresses estivales. L'accélération observée du changement climatique (troisième étiage extrême sur le Rhin en 20 ans) conduit aujourd'hui les experts à anticiper les prévisions en adoptant un diagnostic nettement plus alarmiste. Deux groupes d'experts ont été instaurés à l'été 2022 pour affiner les prévisions de débit et de température de l'eau. Ils prolongent les travaux du groupe « *Étiages* » qui avait publié en 2018 un inventaire des conditions et des situations d'étiage sur le Rhin, actualisé en 2020.

² Commission Centrale de navigation sur le Rhin

³ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

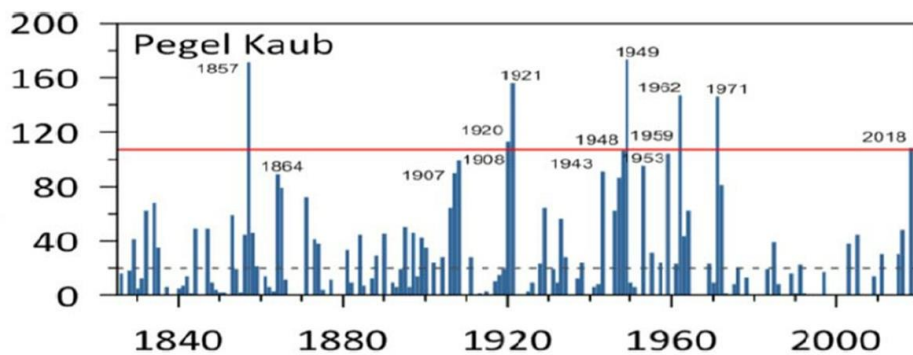
⁴ District Hydrographique International

Figure 3 Fourchette de débits moyens simulés à l'échelle de Cologne à divers horizons temporels [CHR, 52014]



Un recul historique des phénomènes extrêmes des débits rhénans milite en revanche pour une plus grande circonspection. Les irrégularités récentes trouvent des échos dans une série bien plus longue. Deux siècles d'enregistrement du niveau du Rhin prises à l'échelle de Kaub suggèrent que le demi-siècle écoulé constitue une exception, dans une série plus longue ponctuée par des événements tout aussi dramatiques que ceux que l'on vient de connaître. Il n'en demeure pas moins qu'une nouvelle tendance est enclenchée avec le réchauffement climatique dont il s'agit maintenant de mesurer les effets sur les conditions de navigation. Sur le plus long terme, l'événement de 2018 est donc loin d'être une exception, ni même un cas de basses eaux extrême à Kaub depuis 200 ans que le niveau du Rhin est mesuré scientifiquement (Fig.4). Il marque en revanche indéniablement la fin d'une longue période d'écoulement régulier depuis 1971.

Figure 4. Le nombre de jours de basses eaux par an à Kaub depuis 1832 – 2018 [CCNR, 2022.2, p. 6]



2. L'impact des aléas climatiques sur les chaînes logistiques rhénanes

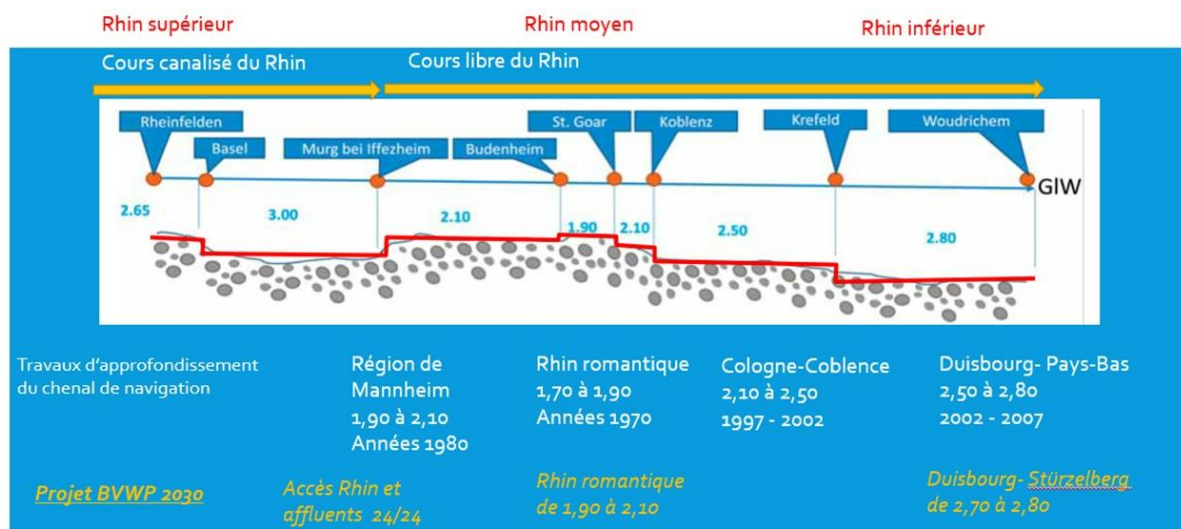
2.1 La navigabilité du Rhin et sa mesure

Pour assurer la régularité des trafics, le gabarit de la voie navigable rhénane est régulièrement mesuré. Sur cette base, les dimensions maximales des unités fluviales ou convois poussés sont spécifiés au chapitre 11 du *Règlement de police pour la navigation du Rhin* qui définit aussi bien les tirants d'air (passage sous les ouvrages d'art que les tirants d'eau (enfoncement maximal), dispositifs que les Etats riverains ont pour

⁵ Commission internationale pour l'hydrologie du bassin rhénan

mission de garantir. Or, le lit du Rhin est en perpétuelle transformation sous l'effet du courant. Les variations de débits ont une incidence directe sur la profondeur d'eau disponible dans le chenal de navigation. Si un niveau minimal habituel en garantit la circulation optimale, le gabarit visé pour le chenal navigable (largeur, profondeur) ne peut pas toujours être atteint, car il dépend des volumes d'eau naturellement disponibles. Aussi les autorités doivent-elle avertir les usagers lorsque le niveau minimal requis (dit « étiage équivalent ») n'est pas atteint (basses eaux) ou lorsque la puissance du débit empêche une navigation en sécurité (hautes eaux). L'établissement de l'étiage minimum pour un gabarit donné à partir d'un niveau d'eau de référence moyen et d'un débit équivalent a été initialement établi à Cologne⁶. La pratique en a été généralisée avec l'Acte de Mannheim (1868), qui détermine d'autres points de repères le long du fleuve et permet de connaître avec précision la navigabilité du Rhin sur l'ensemble de son cours en précisant l'enfoncement maximal disponible. Celui-ci varie en fonction du niveau du fleuve et selon l'encaissement réalisé pour le chenal de navigation. Un schéma de la coupe en long du Rhin (Fig.5) illustre ces variations pour un étiage équivalent comparable (GIW sur le dessin). La profondeur indiquée est celle acquise artificiellement pour le chenal de navigation par un dragage dans le lit naturel du fleuve et constamment entretenu. On voit qu'il est à 1,90 m lors de la traversée du Massif schisteux rhénan, précisément entre Kaub et Saint-Goar. C'est la partie la plus sensible à l'effet d'étiage extrême du Rhin et par où transite la moitié des unités fluviales du Rhin allemand. Ces chenaux de navigation ont été régulièrement approfondis par secteur pour autoriser des unités plus capacitaires. A l'étiage équivalent⁷ est naturellement de 78 cm à Kaub, il faut y ajouter les 1,90 m du chenal creusé dans le lit mineur du Rhin et qui assure un tirant d'eau global de 2,68 m. C'est là le niveau minimal garanti par les aménagements.

Figure 5. Coupe en long du lit du Rhin à grand gabarit mettant en évidence le seuil que constitue la section entre Budenheim et Saint-Goar [CCNR, 2022.1, p. 6].



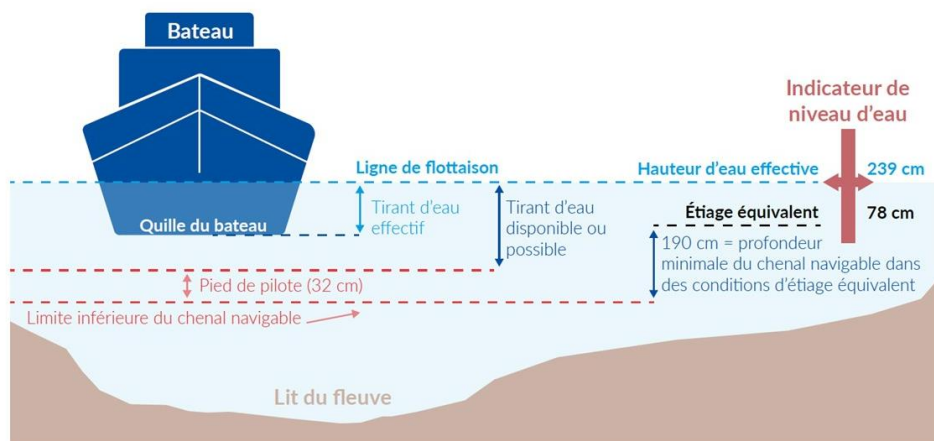
La Commission Centrale, garante de la liberté de navigation sur le Rhin, veille à ce que la disponibilité du Rhin comme voie navigable soit optimale, conformément au principe de la liberté de navigation. Elle est en mesure de décréter l'interruption de la navigation en situation de hautes eaux (article 10.01 Règlement de police du Rhin). En revanche, pour les basses eaux, le seuil de navigabilité est laissé à l'appréciation de chaque capitaine pour un secteur donné. Le risque d'échouage s'accroît avec la baisse du niveau et sa gravité varie selon la nature du lit qui peut être constitué de sable, de gravier ou de roche. Dans ce dernier cas, un

6 Niveau d'eau de l'échelle de Cologne ou *Wasserstand der Pegel Köln*

7 L'étiage équivalent correspond à un seuil de basses eaux en-dessous duquel les niveaux d'eau ne descendent pas plus de 20 jours par an sur une moyenne de 100 ans (CCNR).

Le pied de pilote (niveau disponible sous la coque) est alors porté de 20 à 40 cm pour éviter tout incident, notamment avec l'hélice !

Figure 6. Illustration des termes de la navigabilité sur le Rhin et de sa mesure. L'exemple de Kaub. [CCNR, 2022.2, p.55]



Hautes et basses eaux sont des facteurs limitants pour la navigation. Toutefois, les basses eaux sont plus longues et donc plus pénalisantes, rapportées au nombre de jours de navigation restreinte. Les analyses portent donc beaucoup plus sur le facteur des basses eaux qui risque en outre de s'aggraver à l'avenir comme nous l'avons vu plus haut. Aussi, afin d'évaluer la stabilité des conditions de navigation pour une année donnée, il est aisé de déterminer le nombre de jours par mois et par an pendant lesquels les niveaux d'eau effectifs seront passés en-dessous de l'étiage équivalent pour mesurer les discontinuités d'un service optimal. La situation relative se dégrade plus rapidement dans le Rhin inférieur que sur les secteurs plus en amont (Tab.1).

Tableau 1. Nombre de jours par an présentant un niveau d'eau inférieur à l'étiage équivalent pour des sites de mesure de référence le long du Rhin [CCNR, 2022.2, p. 57]

	<i>Kaub</i>	<i>Oestrich</i>	<i>Maxau</i>	<i>Cologne</i>	<i>Duisbourg</i>
2015	29	23	30	37	39
2016	19	18	27	26	25
2017	28	27	28	23	25
2018	107	78	80	121	128
2019	0	0	0	0	3
2020	0	0	0	11	14
2021	10	4	6	9	13
Moyenne 2015-2021	28	21	24	32	37

A Kaub, point critique pour la navigation sur le Rhin moyen, le passage devient difficile quand le niveau d'eau tombe en dessous de 35 centimètres, même pour les cargos légers ou spécialement adaptés. En dessous de 30 centimètres de profondeur, le passage devient impossible. Le triste record de 25 centimètres mesuré à la jauge de Kaub a été atteint en octobre 2018.

Si le niveau d'eau est le facteur le plus courant, et relativement attendu, même s'il n'est pas prévisible dans son ampleur, d'autres types d'interruptions doivent être pris en compte qui s'avèrent très pénalisants. On peut ici évoquer des raisons liées à un accident, comme en mars 2007, lorsque l'Excelsior a perdu 35 conteneurs mal arrimés à la hauteur Cologne, bloquant complètement 500 bateaux sur le Rhin cinq jours durant entre Mayence et Duisbourg pour un préjudice de l'ordre d'un million d'euros, ou lorsque le Waldhof, un

chimiquier qui a chaviré, coupant la navigation du Rhin vers la Lorelei durant trois semaines et demie en 2011.

2.2 Niveau d'eau, tarification dynamique et report modal

Le facteur de charge (rapport entre la cargaison chargée et la capacité de chargement du bateau) influe sur la rentabilité du transport fluvial (CCNR, 2022). Or, pour ajuster la circulation fluviale aux basses eaux, les bateliers sont amenés à alléger les cargaisons. A l'été 2022, les bateaux accostant au port de Karlsruhe dans le Rhin supérieur étaient en moyenne chargés à un tiers de leur capacité soit 600 tonnes par embarcation contre 2.500 à 3.000 tonnes en temps normal, sans toutefois d'interruption de la navigation [Noyer, 2022]. Les hautes eaux paralysent complètement les trafics.

Aussi, des clauses tarifaires sont prévues et s'appliquent automatiquement lorsque le chargement doit être allégé avec un enchérissement du taux de fret pratiqué pour compenser la situation de transport sous-optimale et les risques accrus (Tab. 2). Pour les chargeurs, le coût de transport s'en trouve aussi alourdi par la nécessité de mobiliser plus d'unités fluviales pour transporter un même volume. Le déséquilibre entre l'offre et la demande renforce encore cette tendance, d'autant que les plus gros bateaux accusant simultanément l'enfoncement le plus important et le meilleur taux de fret sont les premiers touchés par les restrictions. Ainsi, les basses eaux en sollicitant plus la flotte fluviale peut conduire à des situations d'encombrement, d'autant que le chenal navigable contraint la circulation et que, dans les zones les moins profondes, les bateliers réduisent la vitesse, car l'effet d'enfoncement est d'autant plus marqué, lorsque le niveau est bas et sa vitesse de déplacement est élevée⁸. Moins d'eau, c'est aussi plus de puissance nécessaire pour la propulsion. Le batelier doit donc anticiper les variations possibles d'étiage lors d'un parcours qui s'étend au plus sur 5 jours au départ de Rotterdam pour Bâle. Il doit donc prévoir les niveaux d'enfoncement maximum pour franchir les tronçons les plus critiques au moment de son passage. Une variation non anticipée du niveau du Rhin pourrait le contraindre à un coûteux déchargement partiel en cours de route.

Tableau 2. Supplément « Basses eaux » : indexation tarifaire sur le niveau d'eau de Rhin. (Source Contargo, 2022)⁹

Indice de hauteur d'eau à Kaub	Par conteneur 20' plein	Par conteneur 20' plein
159 – 131 cm	30,00 €	40,00 €
130 – 111 cm	45,00 €	60,00 €
110 – 101 cm	60,00 €	75,00 €
100 – 91 cm	75,00 €	100,00 €
90 – 81 cm	100,00 €	135,00 €
< 80 cm	Accord libre	Accord libre

Même prolongées, les basses eaux ne sont pas seules en causes dans le fort recul des tonnages transportés sur le Rhin. Il faut aussi en chercher la raison dans l'évolution de la structure de la flotte dont la capacité moyenne par unité s'est élevée de 1000 à 1400 tonnes depuis 2000. Or, si l'exploitation des gros bateaux est économiquement plus rentable, de tels bateaux sont aussi plus longtemps entravés en situation de basses eaux. Le nombre des unités de moins de 400 t mobilisables lors de faibles débits rhénans a quant à lui chuté de 400 à 179, alors même que leur plus faible enfoncement pénalisait moins, et moins longtemps les circulations. A 134 cm d'eau mesuré à Kaub seuls 50% de la flotte est techniquement en capacité de passer ; à 72 cm elle se réduit à 25% et à 44 cm, cette part tombe à 15%, pour les bateaux de plus faible tonnage.

⁸ Temps que les bateliers peuvent chercher à compenser sur le reste du parcours au détriment de la consommation de carburant.

⁹ Le tableau donne le surcoût pour le transport d'un conteneur au départ de Rotterdam et à destination des terminaux fluviaux en amont de Coblenche.

Avec la hausse tarifaire, certains industriels sont amenés, pour les uns à changer de mode si le report est envisageable et disponible, pour les autres (notamment les opérateurs ayant recours aux transports massifiés) à reporter leurs transports, notamment l'approvisionnement de l'industrie lourde dès lors qu'elle est moins soumise à des process productifs en continu (cas de la chimie), ainsi pour le charbon, les minerais, les carburants ou matériaux de construction. Ces secteurs peuvent puiser dans leurs réserves ou anticiper en surstockant, prévenant ainsi sans dommage les éventuelles disruptions fluviales. Après 3 à 4 semaines d'interruption, les stocks peuvent être reconstitués à mesure que le marché fluvial se détend avec la reprise des trafics. Si les basses-eaux perdurent, la situation peut rapidement devenir critique. Les variations du niveau de l'eau ont donc des effets très directs sur la dynamique tarifaire et plus généralement sur l'activité économique. Les effets marqués des basses eaux du Rhin ont entraîné une répercussion négative que l'on peut établir à une baisse dans la production industrielle allemande de l'ordre de 1 à 2% pour le mois concerné et le suivant, comme l'ont mesuré des chercheurs de l'institut économique de Kiel [Ademmer & al. 2019]. La CCNR de son côté estime les pertes dues aux basses eaux de 2018 à 0,63% de l'activité des troisièmes et quatrièmes trimestres soit 4,68 milliards d'euros [Kriedel, 2019].

La complémentarité et la substitution modale sont des éléments centraux dans la résilience du mode fluvial. Une interruption de navigation sur le fleuve peut conduire en amont et en aval à contourner l'obstacle temporaire au moyen de la route ou du transport ferroviaire. Mais les ruptures de charge en cours d'itinéraire sont particulièrement pénalisantes en coûts et en délais. Aussi ne peut-elle concerner qu'un voyage déjà engagé, sinon une trace directe dans le mode retenu est souvent préférable. Si la valeur de la marchandise ne le justifie pas (charbon, matériaux de construction), le transport sera reporté par un stock sur le quai ou à bord si la marchandise est déjà chargée. Pour les ports fluviaux, très souvent d'importantes zones d'industrie, il est aujourd'hui déterminant de pouvoir garantir aux industriels une alternative modale au départ, en cas d'interruption de l'offre fluviale. Cette stratégie de diversification de l'offre est particulièrement développée en Allemagne où les autorités portuaires ont traditionnellement développé de puissantes zones industrielles sur leurs emprises foncières. Elles ont aussi directement bénéficié de l'aide de l'Etat fédéral dans le maillage des chantiers de transport combiné dans les années 1980. Cela rejoint également les stratégies des grands opérateurs logistiques qui pour des raisons de souplesse commerciale et de sécurité associent des opérations d'armements fluviaux et des offres ferroviaires. Cette intégration fonctionnelle intermodale approche est particulièrement poussée dans l'offre Contargo. L'alternative modale fonctionne en retour au profit de la voie d'eau lorsque les modes alternatifs rencontrent des aléas : hausse brutale du carburant, interruption des services ferroviaires, comme cela a été le cas en 2018 avec l'affaissement de la voie à Rastatt du fait de la construction du tunnel, paralysant pendant des mois tout trafic.

En cas d'interruption ou de limitation de l'offre fluviale, le report modal n'est pas toujours envisageable à l'heure actuelle. D'abord car les coûts sont plus élevés et les capacités perdues sur le fleuve non disponibles ailleurs. La crise énergétique liée à la guerre en Ukraine peut illustrer le principe. En effet, la restriction, puis l'interruption des livraisons de gaz naturel russe à destination de l'Allemagne au cours de l'été 2022, a conduit les autorités à décréter la relance immédiate des centrales thermiques pour l'hiver et à reconstituer des stocks de charbon. Dans le port d'Amsterdam, principal port d'import du charbon, la manutention a alors crû de 41% à 10,4 Mt. Malheureusement, cette relance inopinée coïncidait avec la période de basse eau extrême sur le Rhin (août-septembre) qui mettait hors-jeu le recours pourtant crucial du transport fluvial. Le gouvernement allemand a adopté un règlement donnant priorité à l'approvisionnement ferroviaire des énergies au détriment des trains de voyageurs, soit 50 convois journaliers sur la vallée du Rhin. La difficulté provient de trains non programmés qui sont injectés sur un réseau déjà très fortement sollicité où les chantiers de renouvellement se sont multipliés, notamment dans la vallée du Rhin [Budras, 2022]. Le retour à la navigabilité du Rhin a en revanche naturellement réorienté les flux vers le fleuve. Les autorités portuaires, conscientes des risques d'interruption de la navigation engagent d'importants investissements pour assurer la complémentarité entre modes 8ainsi à Strasbourg avec le raccordement ferroviaire du port sud et à Bâle avec le projet Gateway Basel Nord. Les ports allemands disposent d'ores et déjà d'une meilleure interconnexion rail/voie d'eau [Beyer, 2012] qui reste toutefois à ajuster aux nouveaux besoins.

3. Les adaptations techniques et organisationnelles envisagées

3.1 La prise de conscience de la fragilité du système de transport du Rhin moyen

Dans la vallée du Rhin, deux événements rapprochés dans le temps ont fortement marqué les esprits en soulignant la fragilité du service et son importance cruciale pour les trafics ; l'affaissement de l'artère ferroviaire rhénane pour donner suite au percement du tunnel de Rastatt qui a interrompu la circulation entre août et octobre 2018, puis les basses-eaux du Rhin à l'automne 2018 qui ont imposé une suspension des services pendant près de 80 jours. Dans les deux cas, les reports modaux auront été très imparfaits et les conséquences très pénalisantes pour les usagers. L'importance primordiale des systèmes de transport dans le Rhin moyen a conduit le ministère allemand du transport et des infrastructures à envisager des situations de rupture majeure pour en simuler les effets. La multiplication sensible des phénomènes naturels d'une extrême violence dont les ouragans ou les variations des débits hydrologiques, comme les conséquences d'accidents techniques ou d'exploitation poussent à envisager les conséquences systémiques d'un dérèglement ponctuel qui peut impacter simultanément plusieurs réseaux.

Le ministère fédéral du transport a ainsi coordonné une importante étude de type stress test afin d'évaluer des scénarii de situations climatiques extrêmes des 500 dernières années et de ses effets sur les infrastructures pour le transport de fret et les personnes : hautes et basses eaux, mouvements de masse gravitationnel (éboulement rocheux de la Lorelei etc.) [Hänsel S. & al. 2020]. Le périmètre d'étude retenu est celui du Rhin moyen entre Bingen et Bonn, le plus exposé et le segment plus critique et un des plus stratégiques du réseau de transport en Allemagne, aussi bien pour la voie d'eau, les itinéraires ferroviaires très chargés sur les deux rives du Rhin et les réseaux structurants à leur capacités actuelles (*Bundesstrassen* 9 et 42) dont deux autoroutes. L'étude met en lumière les conséquences pratiques, évolue le temps de remise en état (de quelques jours à plusieurs mois), le coût économique de l'interruption (de l'ordre de 2 M€ par jour d'interruption de la navigation). Des propositions sont aussi faites pour améliorer la connectivité des modes par des hubs de transbordement à des points critiques.

Les scénarii envisagent la durée de l'interruption (événement lui-même et crise en état de plusieurs mois) par mode ou combinées à partir de modèles de trafic envisagent les adaptations possibles sur le reste du réseau selon les capacités nationales des itinéraires alternatifs mais sans pouvoir prendre en considération à ce stade les contraintes des capacités du parc des unités de transport mobilisables. Pour les 5 scénarii, les auteurs de l'étude ont estimé un coût de l'ordre de 300 millions € pour 6 mois d'interruption de navigation. Les modes lourds, notamment la voie d'eau marquée par une faible connectivité est la plus sensible à ces ruptures potentielles. De même, le rail est fortement contraint par des itinéraires alternatifs faute d'électrification n'autorisant pas le même poids à l'essieu. Plus souple, la route s'avère dans l'incapacité de prendre en charge les volumes à rediriger. L'étude détaille également les effets selon les grands acteurs installation (ports, aéroport de Francfort, pôle industriel de la chimie de Mannheim-Ludwigshafen) et préconise les mesures à suivre pour le transport et l'ajustement des systèmes de production.

3.2 Les mesures du gouvernement fédéral et les propositions de la CCNR

L'importance économique de la navigabilité du Rhin est une donnée majeure pour certaines industries de premier plan, comme en témoigne le chimiste BASF à Ludwigshafen. Aussi, le gouvernement allemand face aux risques d'aléa croissant des basses eaux soutient diverses mesures dès 2019 pour garantir sur le long terme la viabilité fluviale du transport rhénan, dont on peut rappeler les éléments centraux :

- **Accélérer l'approfondissement du chenal navigable du Rhin moyen.** Le chantier de dragage et d'approfondissement du chenal navigable [Bundesanstalt für Wasserbau 2022] est reconnu comme prioritaire dans le cadre de planification fédérale des infrastructures de transport à l'horizon 2030 (*Bundesverkehrswegeplan* 2030), aussi bien pour le Rhin moyen que pour le Rhin inférieur afin de garantir l'accès des grandes zones industrielles par le mode fluvial. Cette décision suscite en retour une vive critique des communes riveraines et des écologiques, qui craignent que ces aménagements ne modifient les équilibres naturels déjà bien éprouvés et finissent par accentuer les effets de la baisse du niveau du Rhin lors périodes critiques de sécheresse.
- **Concentrer, ralentir le débit du Rhin - renaturaliser le fleuve.** Le principe retenu est de stocker et conserver l'eau dans l'ensemble du bassin fluvial. Plusieurs moyens peuvent y concourir. La première démarche consisterait à multiplier les barrages de maintien d'étiage, comme il en existe déjà dans les fleuves à courant libre ou d'aménager des retenues d'eau sur les affluents en amont

pour réguler leurs débits. On peut aussi développer les ouvrages de prise d'eau pour des polders qui permettent d'écarter les crues tout en renaturant les zones d'expansion associés. La solution peut lutter contre l'artificialisation des sols ; on sait également qu'un cours d'eau proche de l'état naturel est plus résilient face aux impacts des étiages. Aussi faudrait-il restaurer une morphologie fluviale plus naturelle du cours Rhin et de son bassin pour offrir une meilleure réponse au changement climatique. Dans cette approche, les forêts alluviales et les zones présentant des potentialités de renaturation seraient à développer au profit de la continuité fluviale pour renforcer des retenues et les infiltrations de l'eau en vue de ralentir la vitesse d'écoulement.

- **Modifier les technologies nautiques.** Il s'agit ici d'intervenir sur les bateaux en redessinant la coque, pour limiter au maximum l'enfoncement lors du déplacement. Une autre amélioration peut être apportée par l'information du niveau d'eau en temps réel grâce à un système de sonde embarquée couplée à une diffusion immédiate des données.
- **Adapter la construction nautique.** L'enfoncement des bateaux étant l'élément critique de navigation, les solutions peuvent consister à assurer une plus grande profondeur. Tel est par exemple, l'option de porter à un enfoncement de 2,20 m la section la plus étroite de l'itinéraire rhénan au niveau de Kaub sur une soixantaine de kilomètres afin d'assurer l'homogénéité des conditions techniques du parcours. Encore faut-il que les volumes d'eau y soient disponibles. Pour ce faire, l'approfondissement du chenal de navigation adéquate devrait être favorisé afin de concentrer les plus faibles débits fluviaux sur un sillon plus étroit, au détriment du reste du lit du fleuve. Si l'on peut adapter le fleuve à la flotte existante, on peut aussi à l'inverse porter un regard critique sur les automoteurs toujours plus capacitaires de type grands rhénans au profit d'unités plus légères, exigeant en retour un moindre enfoncement. Les bureaux en ingénierie nautique cherchent à développer des bateaux de grande capacité offrant un enfoncement réduit, ce qui implique une plus grande largeur pour une longueur donnée et potentiellement une moins bonne maniabilité avec la problématique des croisements dans les segments les plus contraints. Cela peut aussi passer par de nouveaux systèmes de propulsion déjà adopté sur d'autres fleuves, moins profonds, comme le Mississippi.
- **Améliorer les prévisions météorologiques pour mieux anticiper.** Un des éléments clés de la gestion logistique est l'anticipation et la prévisibilité. Plus de calculs dans les prévisions météorologiques et d'anticipation des débits du fleuve et des variations de niveau. Aussi la connaissance et l'observation précise des débits du fleuve à travers des prévisions fines de l'ensemble du bassin versant, peut permettre plusieurs jours, voire avec une à deux semaines d'anticipation les niveaux attendus des cours d'eau et ainsi de pouvoir prendre les dispositions nécessaires à l'échelle d'une demande particulière, préparer la demande de report modal ou de l'ensemble du marché. Ici, la complexité des modèles météorologiques et l'évolution rapide des données climatiques opposent une résistance certaine. Dans cette perspective, la CIPR¹⁰ a mis en place en 2019 un monitoring international des étiages. Une échelle de six couleurs, également utilisée dans les bassins de la Moselle et de la Meuse, aide à classer correctement les actuels débits et niveaux d'eau. L'administration allemande des voies navigables et de la navigation a annoncé l'extension, de quatre à dix jours, de ses prévisions relatives au niveau d'eau pour certaines échelles du Rhin et jusqu'à 6 mois avec des tendances probabilistes.

Dans son document de réflexion « Act now ! » de 2021 consacré aux basses eaux et à leur impact sur la navigation rhénane [CCNR, 2022.2], la Commission centrale de navigation du Rhin retient également des mesures synthétisées sous forme d'un tableau croisant trois horizons temporels et des leviers liés aux aménagements de la voie navigable, à l'évolution de la flotte et enfin aux réponses logistiques à apporter et dont les conclusions convergent largement avec les propositions allemandes (Tab. 3).

Tableau 3. Mesures préconisées par la CCNR pour compenser les aléas croissants des débits du Rhin

	Court terme	Moyen terme	Long terme
Infrastructure	- Amélioration des prévisions relatives aux niveaux d'eau - Information actualisée sur la profondeur des chenaux	- Approche intégrée de la planification des projets Accélération de la mise en œuvre de l'optimisation de la	- Etude des possibilités de génie hydraulique et de la gestion de l'eau pour assurer des conditions de

¹⁰ Commission Internationale pour la Protection du Rhin

	<i>navigables grâce à des solutions numériques et la capacité des barges à échanger entre elles des relevés dynamiques en temps réel</i>	<i>profondeur du chenal navigable dans la vallée du Rhin moyen et inférieur.</i>	<i>transport fiables sur le Rhin -Amélioration de la gestion de l'eau sur le Rhin -Etude de la possibilité d'une nouvelle planification pour les réservoirs d'eau ou une extension de la planification existante</i>
Flotte	<i>-Recherche en matière d'optimisation des bateaux existants -Recherche en matière d'optimisation des nouvelles constructions</i>	<i>-Dialogue entre l'industrie, la politique et les associations environnementales -Utilisation de bateaux plus petits dans des formations à coule</i>	
Chargeurs Industrie Logistique	<i>-Contrat d'affrètement à temps pour les barges adaptées aux faibles niveaux d'eau Optimisation du contrôle de la chaîne d'approvisionnement Réaménagement opérationnel du site logistique (par ex. allongement des heures 'ouverture)</i>	<i>-Optimisation du transport de conteneurs - Construction/optimisation de terminaux pour faciliter le transfert modal -Adaptation des concepts de transport/stockage -Dialogue entre l'industrie, la politique et les associations environnementales</i>	<i>-Expansion des capacités de manutention et de stockage dans les ports situés à proximité des sites industriels</i>

Conclusion

Après plusieurs décennies d'un environnement plus régulier, les effets du changement climatique ont un impact croissant sur l'irrégularité des débits du Rhin. Les phénomènes de hautes et basses eaux connaissent dès aujourd'hui une amplification qui, selon les scientifiques, aurait dû intervenir entre 2050 et 2100. Comparé aux autres grands fleuves mondiaux son cours demeure néanmoins assez équilibré et ne présente pas de problème de capacité. Toutefois, les rapides modifications climatiques ont un impact direct sur la navigabilité du Rhin, notamment pour les périodes d'étiage qui se sont prolongés sur plusieurs mois en 2018 et à nouveau en 2022. Les conditions naturelles par leur intensité nouvelle ne sont pas seules en cause dans la pénalisation du transport fluvial. La structure de la flotte qui s'est restructurée autour d'unités plus grandes avec un enfoncement accru rend le service nettement plus vulnérable aux basses eaux. Les systèmes productifs exigent une disponibilité continue de l'offre, désormais mise à mal par les aléas climatiques, peu prévisibles quant à leur apparition et leur durée. L'importance des volumes de trafics et la faible interconnexion des modes de transfert rendent difficile le report modal.

Néanmoins, d'un point de vue fluvial, des mesures sont à l'étude pour compenser des débits plus faibles et qu'il convient d'accompagner. Il y a d'abord l'aménagement de la voie navigable avec l'approfondissement du chenal de navigation (notamment dans le Rhin moyen), le soutien et régulation du débit d'étiage. L'intervention concerne ensuite les bateaux avec l'adoption d'unités fluviales d'un moindre tirant d'eau grâce à une nouvelle architecture des coques, ou le retour à des unités plus légères et plus maniables. Une meilleure anticipation des variations des niveaux d'eau peut aussi conduire à ajuster les schémas logistiques par une prévision affinée des niveaux d'eau. Les bateaux peuvent être équipés individuellement de capteurs permettant d'affiner leur conduite et de développer une intelligence collective en temps réel à l'ensemble des navigants. L'option d'un recours massif au transfert modal est à soutenir dès lors que l'aménagement

d'interconnexion dans des ports dimensionnés pour de tels transferts. Enfin, les aléas hydrologiques conduisent à un report dans le temps des volumes à transporter et un accroissement des stocks nécessaires, pouvant aller jusqu'à un ajustement des rythmes de production. La réponse à l'évolution du débit du Rhin repose donc non sur le renoncement à la navigation mais à une réponse coordonnée de systèmes à la recherche d'un nouvel équilibre. Les solutions envisagent l'adaptation des chaînes logistiques aux nouveaux débits du Rhin, supposant de détendre les chaînes logistiques pour mieux faire face aux aléas du fleuve.

Bibliographie

- ADEMME, M. *et al.* (2018) - « Zum Einfluss des Niedrigwassers auf die Konjunktur », *IfW-Box* 2018.17. Institut für Weltwirtschaft Kiel », 4 p.
- BEYER, A. (2012) – « Quand les gestionnaires portuaires opèrent des trains. Les ports fluviaux allemands et leurs filiales ferroviaires », Colloque AIVP, Nantes – St Nazaire, 18 – 21 juin 2012, 20 p.
- BRAHMER, G. *et al.* (2018) - *Inventaire des conditions et des situations d'étiage sur le Rhin*, Commission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR), 93 p.
- BUDRAS, C. (2022) - « Vorfahrt für die Kohlerzüge », *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, édition du 26/10/2022.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (2022) - *Wissenschaftliche Begleitung des Projekts Abladeoptimierung der Fahrrinnen am Mittelrhein*, Bonn, 21 p.
- COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN (CCNR) (2022.1) -*Document de réflexion « Act now ! » consacré aux basses eaux et à leur impact sur la navigation rhénane Édition 2.0 du 23 février 2021*, document de travail, Strasbourg 37 p.
- COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN (CCNR) (2022.2) - *Observation du marché. Rapport annuel 2022*, Strasbourg, 148 p.
- COMMISSION FOR THE HYDROLOGY OF THE RHINE BASIN (2014) - *Impact of Regional Climate Change on Discharge in the Rhine River basin (RheinBlick2050)*.
- HÄNSEL, S. *et al.* (2020) - *Einflüsse naturgefahrenbedingter Streckensperrungen auf überregionale Verkehrsströme – Verkehrsträgerübergreifende Stresstestszenarien für die Region 'Mittelrhein'*. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks, Berlin, 95 p.
- KLEIN, B., MEIBNER, D. (2016) -*Vulnerability of Inland Waterway Transport and Waterway Management on Hydro-meteorological Extremes*, Technical Report IMPREX D9.1, 95 p.
- KRIEDEL, N. (2019) – « Macroeconomic Effects of Low Water Levels on the Rhine – a Statistical Analysis », Workshop *Low Waters and Consequences on Navigation of the Rhine*, 26th November 2019, Ministry of Transport and Digital Infrastructure, Bonn.
- NOYER, M. (2022) - « Rhin supérieur : des basses eaux pénalisantes aussi sur la rive allemande », *L'Antenne*, 10 oct. 2022.
- STAHL, K., *et al.* (2022) - *Impact of Climate Change on the Rain, Snow and Glacier melt Components of Streamflow of the River Rhine and its Tributaries*. CHR report no. I 28. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad, 30 p.
- TRT (Trasporti e Territorio), TML (Transport & Mobility Leuven), M-Five GmbH Mobility, Futures, Innovation, Economics, SSP CONSULT, Lucchini-Mariotta e Associati SA (2019), *Transport Market Study: “Quantification of modal shift potential on the Rail Freight Corridor Rhine-Alpine” Summary Report*, Milan, 33 p.