



# Inventaire des conditions et des situations d'étiage sur le Rhin

Mise à jour : 04.05.2018

Internationale  
Kommission zum  
Schutz des Rheins

Commission  
Internationale  
pour la Protection  
du Rhin

Internationale  
Commissie ter  
Bescherming  
van de Rijn

Rapport n° 248



**Editeur:**

Comission Internationale pour la Protection du Rhin (CIPR)  
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, D 56068 Coblenze  
Postfach 20 02 53, D 56002 Coblenze  
Téléphone +49-(0)261-94252-0, téléfax +49-(0)261-94252-52  
Courrier électronique: sekretariat@iksr.de  
[www.iksr.org](http://www.iksr.org)

© IKSР-CIPR-ICBR 2018

**Groupe d'experts 'Etiages' (GE LW) de la CIPR**

Présidence : Gerhard Brahmer (HLNUG)

CH : Caroline Kan (OFEV)

F : Anne Toussiot (DREAL)

DE : Herbert Walter (WWA Aschaffenburg)

LUX : Noémie Patz, Daniel Göhlhausen (Administration de la gestion de l'eau)

NL : René van den Heuvel (Rijkswaterstaat)

AT (participation informelle) : Ernst Überreiter (BMNT)

FL (participation informelle) : Elija Kind (LLV)

CCNR (observateur) : Kai Kempmann

CHR (observateurs) : Eric Sprokkereef

Alsace Nature (observatrice) : Jean Wencker

WWF NL (observateur) : Bas Roels

Secrétariat de la CIPR : Anne Schulte-Wülwer-Leidig, Adrian Schmid-Breton,

Dominique Falloux, Isabelle Traue, Fabienne van Harten, Marianne Jacobs

## Rapport du GE LW

### « Inventaire des conditions et des situations d'étiage sur le Rhin »

#### Sommaire

Index des illustrations .....	3
Index des tableaux .....	4
Registre des annexes .....	5
1. Résumé .....	6
2. Contexte et problématique.....	8
2.1 Contexte et données du problème.....	8
2.2 Mandat du groupe d'experts 'Etiages' .....	9
3. Analyses disponibles dans le bassin du Rhin, ses sous-bassins et d'autres bassins fluviaux .....	9
4. Définitions et démarche.....	12
5. Données de base et méthodes.....	13
5.1 Sélection des stations d'analyse et base de données hydrologiques.....	13
5.2 Paramètres d'étiage .....	14
5.3 Méthodes d'évaluation et d'analyse .....	15
6. Inventaire.....	16
6.1 Conditions hydrologiques dans le bassin du Rhin.....	16
6.2 Inventaire des influences sur les débits (prélèvements, apports d'eau, dérivations, rétention et restitution différée de l'eau).....	17
6.3 Inventaire des vulnérabilités face aux étiages dans le Rhin .....	21
6.4 Gestion nationale des étiages.....	26
7. Analyse des chroniques des échelles du Rhin.....	30
7.1 Comportement des paramètres d'étiage dans le long terme .....	30
7.2 Période de référence et paramètres d'étiage .....	34
7.3 Débits d'étiage .....	37
7.4 Durées des étiages .....	42
7.5 Description et classification d'épisodes d'étiage historiques sélectionnés - (exemple : l'épisode d'étiage d'août/septembre 2003).....	44
8. Eventuels impacts du changement climatique sur les futures conditions d'étiage du Rhin.....	45
8.1 Résultats des analyses disponibles dans le bassin du Rhin.....	45
8.2 Analyse des projections de débit COSMO-CLM4.8-A1B .....	48
8.3 Impacts à prendre en compte sous l'aspect de la prévention des étiages .....	49
9. Monitoring des étiages .....	50
9.1 Détermination d'une classification de conditions de développement d'étiages .....	50
9.2 Validation de la classification des étiages à l'aide des chroniques historiques .....	51
10. Conclusions .....	55
Bibliographie.....	57
Annexes .....	61

## Index des illustrations

Figure 1 : localisation des échelles d'analyse sur le Rhin, y compris débit d'étiage moyen pluriannuel sur 7 jours consécutifs (MNM7Q).....	14
Figure 2 : Régime hydrologique typique du bassin du Rhin selon Pardé ; période de référence 1961-1990 .....	16
Figure 3 : principaux prélèvements et apports d'eau dans le Rhin et dans son bassin ....	20
Figure 4 : système de transfert Danube-Main.....	21
Figure 5 : Schéma simplifié des liens de causes à effets des étiages sur les utilisations de l'eau .....	21
Figure 6 : Cycle de la gestion des étiages et des champs d'actions correspondants .....	26
Figure 7 : liste nationale d'ordre de priorité aux Pays-Bas .....	29
Figure 8 : hydrogrammes de l'épisode d'étiage d'août/septembre au cours de l'année hydrologique 2003.....	33
Figure 9 : valeurs annuelles NM7Q à l'échelle de Diepoldsau et points de rupture identifiés .....	34
Figure 10 : valeurs annuelles NM7Q à l'échelle de Maxau et points de rupture identifiés	35
Figure 11 : valeurs annuelles NM7Q à l'échelle de Kaub et points de rupture identifiés ..	35
Figure 12 : valeurs annuelles NM7Q à l'échelle de Cologne et points de rupture identifiés .....	36
Figure 13 : analyse de tendances de la série NM7Q à l'échelle de Bâle .....	37
Figure 14 : analyse de tendances de la série NM7Q à l'échelle de Cologne .....	38
Figure 15 : analyse de tendances de la série NM7Q à l'échelle de Mayence en été (avril-septembre) .....	39
Figure 16 : analyse de tendances de la série NM7Q à l'échelle de Mayence en hiver (novembre-mars) .....	40
Figure 17 : série annuelle du paramètre Durée de non-atteinte MaxD (en jours) pour l'échelle de Kaub .....	44
Figure 18 : monitoring rétrospectif aux échelles de Bâle, Kaub et Lobith.....	52

## Index des tableaux

Tableau 1 : volumes de rétention des lacs de retenue dans le bassin du Rhin .....	18
Tableau 2 : relevé des épisodes d'étiage entre 1920 et 2015 dans le Rhin avec indication des périodes de retour (probabilités d'occurrence statistiques) du plus petit débit « NM7Q » et de la durée maximale « MaxD » sous le MNM7Q (échelle de Rekingen jusqu'à Lobith). .....	31
Tableau 3 : paramètres de débit moyen et de débit d'étiage aux échelles du Rhin .....	32
Tableau 4 : Pourcentages de débit de l'échelle de Bâle .....	32
Tableau 5 : dates (années) de points de rupture selon des analyses de rupture.....	36
Tableau 6 : résultats de l'analyse de tendances des séries NM7Q pour toute la période d'analyse et la période de référence homogène (MK = test Mann-Kendall ; FQS/t-test = test t du coefficient de pente des droites). .....	38
Tableau 7 : résultats de l'analyse de tendances des séries NM21Q pour toute la période d'analyse et la période de référence homogène (MK = test Mann-Kendall ; FQS/t-test = test t du coefficient de pente des droites). .....	39
Tableau 8 : débits d'étiage NM1Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3) .....	40
Tableau 9 : débits d'étiage NM3Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3) .....	41
Tableau 10 : Débits d'étiage NM7Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3) .....	41
Tableau 11 : Débits d'étiage NM21Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3) .....	41
Tableau 12 : Débits d'étiage NM60Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3) .....	42
Tableau 13 : nombre moyen de jours par an pendant lesquels la valeur seuil MNM7Q n'est pas atteinte.....	42
Tableau 14 : durées (en jours) des étiages annuels restés au-dessous de la valeur seuil MNM7Q. ....	43
Tableau 15 : Classification de paramètres d'étiage de l'épisode 2003 en temps de retour .....	43
Tableau 16 : Fourchette de modification du NM7Q à différentes échelles du Rhin (source : rapport CIPR n° 188, CIPR, 2011) .....	46
Tableau 17 : modifications des conditions d'étiage pour le futur proche à l'échelle de Kaub (modification de débit en %, durée de modification en jours) .....	47
Tableau 18 : paramètres d'étiage pour la projection de débit COSMO-CLM4.8-A1B .....	48
Tableau 19 : projection modélisée de la durée MaxD < NM7Q2 en jours .....	49
Tableau 20 : définition de classes d'étiage .....	50
Tableau 21 : nombre annuel de jours d'étiage à l'échelle de Bâle.....	53
Tableau 22 : nombre annuel de jours d'étiage à l'échelle de Kaub.....	53
Tableau 23 : nombre annuel de jours d'étiage à l'échelle de Lobith.....	53

---

## Registre des annexes

Annexe 1 : comparaison des impacts des épisodes d'étiage de 2003 et de 2011 sur la base de l'European Drought Impact Inventory (EDII) (Kohn, 2017) .....	62
Annexe 2 : Description des épisodes d'étiage sélectionnés .....	63
Annexe 3 : présentation des durées d'étiage (MaxD) ( <i>non traduite, voir légende au chapitre 7.4</i> ) .....	82
Annexe 4 : validation de la classification des étiages à l'aide des chroniques .....	87

## 1. Résumé

Après une longue période peu marquée par les étiages depuis le début des années 1980, les faibles débits de l'été caniculaire de 2003 et leur impact négatif sur l'écologie du Rhin, de même que les événements plus modérés survenus par la suite, ont réactivé la perception du public à la problématique des étiages. En outre, le changement climatique est susceptible de faire effet sur les mécanismes de genèse et de développement des étiages. Le sujet a été thématiqué en 15<sup>e</sup> Conférence ministérielle sur le Rhin de 2013 et ancré dans le programme de travail 2016-2021 de la CIPR.

Un groupe d'experts 'Etiages' a été mis en place pour répertorier et analyser les connaissances disponibles sur les épisodes d'étiage dans le bassin du Rhin et pour soumettre aux Etats riverains du Rhin une approche commune de compréhension des étiages et, plus particulièrement, de leurs effets transfrontaliers et des possibilités de coopération envisageables. Les débits d'étiage du Rhin au centre des analyses sont ceux dont la genèse et l'intensité découlent naturellement des conditions hydrométéorologiques en présence dans son bassin.

Les nombreuses définitions du terme « étiage » ont en commun de se rapporter à un seuil spécifique de niveau d'eau ou de débit non atteint. Dans le cadre du présent inventaire comparatif, les débits analysés sont donc ceux dont les paramètres statistiques d'étiage sont à considérer en relation avec des valeurs seuils de débit correspondantes pour un certain nombre d'échelles le long du Rhin. On s'est fondé sur le paramètre NM7Q (ou VCN7) largement reconnu, qui correspond à la plus faible moyenne arithmétique de débit sur 7 jours consécutifs d'une période de référence (année), ainsi que sur des paramètres correspondants pour des périodes plus longues. Pour obtenir des valeurs seuils comparables le long du Rhin, on a évalué les paramètres à partir de valeurs statistiques extrêmes pour 10 échelles retenues dans l'analyse, depuis Diepoldsau en amont du lac de Constance jusqu'à Lobith compris, à la frontière germano-néerlandaise, et on en a tiré des valeurs seuils correspondant à des probabilités d'occurrence (T = 2, 5, ... jusqu'à centennale). Il a été tenu compte de l'aspect de la durée d'un épisode d'étiage par analyse des jours consécutifs de débits inférieurs à ces valeurs seuils.

Les apports quantitatifs des différents sous-bassins du Rhin sont essentiels pour déterminer le régime naturel d'étiage. Les évaluations des valeurs mesurées aux échelles le long du Rhin mettent également en relief pour les étiages l'importance de l'apport de débit issu des zones alpines et préalpines, qui constitue encore, même aux Pays-Bas, à peu près la moitié du débit d'étiage moyen. Le régime hydrologique variable, avec son minimum hivernal en zone nivale (jusqu'à Bâle) et son minimum estival en zone pluviale (en aval de Worms) garantit en outre une certaine résilience du Rhin dans son ensemble face aux épisodes d'étiages extrêmes.

Les débits d'étiage du Rhin sont impactés par des apports et dérivations d'eau ainsi que par la gestion des retenues. Les principaux transferts d'eau sont ceux effectués depuis le bassin de l'Inn vers celui du Rhin (7,8 m<sup>3</sup>/s) et depuis le bassin du Danube vers celui du Main/Rhin (jusqu'à 16 m<sup>3</sup>/s). Les dérivations à partir du bassin du Rhin vont vers le bassin du Tessin (env. 2m<sup>3</sup>/s) et vers celui du Rhône (env. 3 m<sup>3</sup>/s). On chiffre comme prélèvements directs à partir du Rhin jusqu'à 1,5 m<sup>3</sup>/s perçus sur le Rhin supérieur septentrional pour recharger la nappe par infiltration et env. 5 m<sup>3</sup>/s destinés à l'irrigation agricole. Les mesures susmentionnées font que les apports dominant et que le bilan final est globalement positif pour le Rhin. La gestion des retenues en zone alpine et préalpine pour l'exploitation hydroélectrique a un impact encore plus positif sur les débits d'étiage du Rhin. Ici, un volume de plus de 1,8 milliards de m<sup>3</sup> est mis à disposition pour retenir les eaux estivales et pour les restituer ensuite au Rhin après turbinage pendant la période d'étiage dominante en hiver. Les débits d'étiage du Rhin sont ainsi rehaussés dans un ordre de grandeur de l'ordre de 100 à 120 m<sup>3</sup>/s en hiver.

La qualité de l'eau et l'écologie, enjeux vulnérables, sont directement impactées par les étiages, et des impacts négatifs sont relevés pour les usages tels que la navigation, la production énergétique, l'industrie, l'agriculture, le tourisme et les loisirs, de même que la sécurité des équipements et infrastructures.

Lors d'épisodes d'étiage passés, il n'a pas été identifié d'impacts négatifs graves et prolongés sur la qualité des eaux du Rhin sur le cours principal. Ceci est notamment dû aux efforts considérables réalisés dans le domaine de l'épuration des eaux usées au cours des décennies passées. Des problèmes d'ordre écologique surviennent en particulier pendant les étiages estivaux, où les faibles débits sont accompagnés d'une hausse de température des eaux et, par conséquent, d'une baisse des teneurs en oxygène (mortalité de poissons et de coquillages en 2003). Les groupes de travail 'Ecologie' (GT B) et 'Qualité des eaux/émissions' (GT S) ont ajusté leurs positions dans le cadre de l'élaboration du rapport.

En phase d'étiage, la navigation intérieure et les personnes et entreprises économiques dépendant de cette activité sont touchées à une échelle transfrontalière avec, à la clé, des répercussions négatives sur l'économie et des pénuries d'approvisionnement de vecteurs énergétiques et de matières premières. Aux Pays-Bas, l'approvisionnement en eau est perturbé quand les eaux de surface sont salinisées par l'intrusion d'eau de mer dans les terres. Ceci peut entraîner un arrêt ou des restrictions de captage d'eau pour la production d'eau potable ou de prélèvement d'eau d'irrigation des cultures agricoles. Le secteur de la production d'énergie est touché d'une part par une baisse de production des usines hydroélectriques et d'autre part par des restrictions de prélèvement d'eau de refroidissement ou de rejet d'eaux réchauffées. Les entreprises industrielles et les PME peuvent aussi être amenées à réduire leurs activités. Les digues de tourbe érigées aux Pays-Bas peuvent devenir instables à certains endroits en période d'étiage.

L'analyse de chroniques montre que les étiages du Rhin sont nettement plus prononcés dans la première moitié du siècle passé que dans les 50 dernières années, avec des débits également plus bas et plus longtemps inférieurs aux seuils fixés. On note aussi une tendance à la hausse significative des débits d'étiage du Rhin entre Diepoldsau et Andernach sur l'ensemble de la période considérée de 1901 à 2010. Cette tendance n'est pas régulière sur cette centaine d'années, mais connaît une inflexion autour des années 1960-1970 qui est principalement due à l'influence de la gestion des retenues dans la zone alpine. La gestion des retenues est responsable de la modification des débits d'étiage à partir des années 1960-1970. Les précipitations annuelles tendanciellement en hausse relevées au cours du 20<sup>e</sup> siècle dans le bassin du Rhin peuvent également contribuer à cette évolution. On ne détecte aucune tendance significative de 1961 à 2010 concernant les débits d'étiage. La perception actuelle des épisodes d'étiage est influencée d'une part par l'absence prolongée d'étiages significatifs et d'autre part par une plus grande vulnérabilité.

A la lumière des projections de débit disponibles pour la période 2021-2050, les débits d'étiage du Rhin oscillent sous l'effet du changement climatique dans une fourchette allant de baisses d'env. 10 % à des hausses d'env. 10 % également, sans laisser percevoir d'évolution univoque. Dans un avenir plus lointain (2017-2100), les projections de débit font apparaître uniformément des baisses de débit d'étiage importantes pendant l'été hydrologique.

En partant d'un scénario pessimiste intégrant une baisse de 5 à 10 % du MNM7Q (débit d'étiage moyen pluriannuel sur 7 jours consécutifs) sur la période comprise entre 2021 et 2050, on obtient pour des périodes de retour croissantes des baisses plus importantes de l'ordre de 7 à 14 % maximum pour des débits d'étiage d'une récurrence de 2 à 50 ans. La baisse de débit est accompagnée d'une nette prolongation de la durée de l'étiage.

A l'avenir, les épisodes d'étiage estivaux pourraient avoir des répercussions négatives croissantes sur l'écologie du Rhin. En effet, quand les débits sont bas, les températures de l'eau peuvent augmenter plus fortement en été. Les épisodes d'étiages estivaux de 2003 et 2006 en sont des exemples. Selon les analyses réalisées par le groupe d'experts STEMP de la CIPR, il faut compter avec une augmentation des températures estivales des eaux du Rhin de l'ordre de 1,5 degrés pour le futur proche et de plus de 3 degrés pour le futur éloigné. Il en résulte entre autres pour le futur proche (2021-2050) un doublement des jours avec des températures de l'eau dépassant 25 degrés (valeur seuil critique sous l'angle écologique) sur le Rhin.

Il semble judicieux de mettre en place un monitoring des étiages sur le Rhin afin de permettre une surveillance uniforme de ces phénomènes sur l'ensemble du linéaire. Les événements récents peuvent être directement classés et comparés et les éventuelles évolutions du régime d'étiage mieux détectées.

A partir d'une analyse détaillée de chroniques de débits, on a déterminé pour le Rhin, en concertation avec les Commissions Internationales pour la Protection de la Moselle et de la Sarre (CIPMS), des valeurs seuils rapportées à des débits à l'aide desquelles un épisode d'étiage peut être classifié en cinq niveaux d'intensité allant « d'étiage normal » à « étiage extrêmement rare ». Les chroniques de débit ont confirmé l'adéquation de cette classification, qui ordonne les épisodes d'étiage de manière différenciée, et ont permis sa validation. Les étiages extrêmes peuvent aisément être distingués des événements moins marquants mais la classification conserve une sensibilité suffisante pour les étiages de moindre intensité.

On retient en résumé que les étiages du Rhin ne sont pas plus marquants qu'il y a un siècle mais qu'ils affectent aujourd'hui plus fortement de nombreux usages (navigation, industrie, agriculture, production énergétique, etc.). La demande en eau et les répercussions socio-économiques de la ressource en eau pourraient augmenter dans le bassin du Rhin. En parallèle, les étiages peuvent affecter les écosystèmes aquatiques, notamment quand ils sont accompagnés de températures élevées de l'eau. Quelques projections climatiques laissent penser que les épisodes d'étiage accompagnés de températures d'eau plus élevées se produiront plus fréquemment en été à l'avenir. Tous ces aspects incitent à surveiller les évolutions futures des étiages sur le Rhin.

## **2. Contexte et problématique**

### **2.1 Contexte et données du problème**

En 15<sup>e</sup> Conférence ministérielle sur le Rhin de 2013, les tâches confiées à la CIPR pour les années suivantes ont été formulées. Le plan de travail 2016-2021 de la CIPR détaille et concrétise ces tâches. La thématique des étiages a été intégrée dans la rubrique intitulée « Changement climatique et adaptation ». Il y a été indiqué que le sujet des étiages devait être concrétisé. Une première étape doit consister à effectuer une analyse précise des étiages. La question des étiages comporte à la fois des aspects hydrologiques et des aspects qualitatifs (température et chimie).

Le GT H est chargé de mettre en relief les aspects hydrologiques des étiages et de les analyser plus en détail. Les GT S et B considèrent les aspects qualitatifs des étiages. A cette fin, le GT H a mis en place un nouveau groupe d'experts 'Etiages' (GE LW) qui s'est réuni pour la première fois le 17 janvier 2017.

#### **Données du problème**

A l'heure actuelle, les Etats riverains n'ont pas de vue commune des situations d'étiage, bien que chacun soit confronté à des phases périodiques d'étiages (extrêmes). Il n'y a pas non plus de perception commune de l'importance des effets transfrontaliers des étiages ni des opportunités pouvant se dégager d'une coopération transfrontalière dans la recherche de solutions aux principaux problèmes découlant des étiages.

Le développement d'une telle perception commune des étiages sur le Rhin est désormais engagé avec la mise en place du GE LW.

Le GE LW a pour mandat de dresser un large inventaire des connaissances sur les étiages dans le bassin du Rhin, d'effectuer une analyse à partir de cet inventaire et de faire le monitoring, à l'échelle du bassin, des évolutions possibles des situations d'étiage. Il est tenu compte dans ce contexte des éventuels effets du changement climatique.

Le GE LW est également chargé de partager activement ses connaissances avec les autres Groupes de travail (en particulier les GT S et B), afin qu'il soit possible d'estimer/évaluer les impacts des étiages sur les fonctions écologiques et les usages anthropiques des hydrosystèmes.

## 2.2 Mandat du groupe d'experts 'Etiages'

Le groupe d'experts 'Etiages' (GE LW) a subdivisé son mandat en différentes tâches présentées ci-après. Le présent rapport donne connaissance des activités réalisées pour exécuter ces tâches. En parallèle, le présent rapport constitue un des produits visés que le GE LW a élaboré dans l'exécution de son mandat.

### 1. Inventaire des connaissances sur les étiages dans le DHI Rhin

- analyse des situations d'étiage par évaluation de données mesurées (chroniques longues) rapportées aux échelles ;
- analyse et description de phases d'étiage extrême sélectionnées ;
- Rassemblement des influences sur les étiages et des usages et fonctions affectés par les étiages ;
- observations sur les répercussions du changement climatique sur les étiages avec prise en compte des résultats du GE KLIMA/CHR-Rheinblick2050 et reprise des paramètres de modification déterminés dans ces travaux ;
- échange sur les suivis nationaux d'étiages et sur des aspects de gestion des étiages, y compris aspects transfrontaliers.

### 2. Mise en place d'un suivi des étiages (réseau d'analyse et paramètres d'observation)

3. **Echange d'informations avec les autres Groupes de travail** (GT S et GT B) et éventuellement sur d'autres usages, eu égard à leur vulnérabilité respective.

4. **Mise au point d'une contribution** (rapport) pour la réponse du GT H au mandat de la Conférence ministérielle sur le Rhin de 2013 (et préalablement à la prochaine Conférence ministérielle sur le Rhin). **Mise au point d'une contribution** pour la recommandation du GT H sur les résultats des travaux, sur l'état des connaissances et sur la question de la pertinence/nécessité d'un plan CIPR de gestion des étiages

## 3. Analyses disponibles dans le bassin du Rhin, ses sous-bassins et d'autres bassins fluviaux

Les analyses de débit revêtent un grand intérêt en regard de l'importance du Rhin, l'un des plus grands fleuves d'Europe. La « Monographie du Rhin » (CHR, 1978) par exemple, qui se compose de cartes, de textes et de tableaux, est un recueil fondamental et détaillé sur les débits du Rhin et de ses principaux affluents et sur les conditions hydrologiques dans le bassin du Rhin. On y trouve déjà des déclarations sur l'année 1947, caractérisée par « un épisode d'étiage extrême » ainsi que des « considérations sur les périodes d'étiage de 1959 et 1964 ».

Les impacts de l'action humaine sur les débits du Rhin sont rassemblés dans Buck et al. (1993). La construction de barrages notamment avec une capacité de rétention totale de plus d'1,8 milliard de mètres cubes en amont de Bâle illustre cet impact (homogénéisation des débits) sur les étiages. Belz et al. (CHR, 2007) présente une analyse des débits du Rhin et de ses affluents sur tout le 20<sup>e</sup> siècle. C'est la première fois qu'est analysée en termes quantitatifs et documentée la dynamique de développement hydrologique sur l'ensemble du bassin du Rhin et sur une période aussi longue. Les analyses portent sur l'évolution du régime hydrologique, les débits moyens et de crue ainsi que sur l'évolution des étiages durant le 20<sup>e</sup> siècle. La synthèse des résultats sur les étiages décrit cette évolution et débouche sur un résultat clair :

*« Les étiages extrêmes observés se sont atténués au cours du 20<sup>e</sup> siècle dans le bassin du Rhin. Ce constat vaut notamment pour le Rhin même et ses grands affluents ; on note des différenciations régionales plus marquées dans les bassins de petits affluents tributaires. En regard des corrélations décrites ci-dessus, il est compréhensible que cette atténuation soit plus intense là où l'hiver est la période d'étiage proprement dite, c'est-à-dire dans la partie méridionale du bassin du Rhin caractérisée par un régime nival. Dans les hautes terres et les plaines au régime pluvial en revanche, où les périodes d'étiage apparaissent en général à la fin de l'été ou en automne, on ne relève pas de tendance atténuante étant donné que les précipitations n'évoluent guère pendant ces mois. Seuls*

*des impacts d'autre type, comme le montre l'exemple des transferts effectués depuis le Main, expliquent les exceptions à cette règle » (Belz et al., 2007).*

Dans le cadre du projet KLIWAS, les impacts du changement climatique sur les voies navigables et la navigation en Allemagne ont été analysés (BMVBS - ministère fédéral allemand des Transports, 2009). KLIWAS en conclut : *« Pour la partie méridionale du bassin du Rhin, où l'hiver est en général la période des débits les plus faibles dans les eaux de surface, ceci signifie une augmentation sensible des débits et, par là même, une atténuation des étiages extrêmes. Au nord du Main en revanche, les niveaux d'eau les plus bas sont en fin d'été et en automne. On observe donc ici une tendance neutre ou une légère tendance à la baisse des étiages extrêmes. Cette légère intensification des étiages extrêmes dans la partie septentrionale du bassin du Rhin est toutefois si faible qu'elle ne peut être jugée statistiquement significative » (BMVBS, 2009).*

Le projet « Rheinblick 2050 » (Görgen et al., 2010) a pris en compte un large ensemble de projections climatiques pour le 21<sup>e</sup> siècle dans le but de modéliser dans le bassin du Rhin les futurs débits qui seront impactés par le changement climatique. A propos des étiages, le rapport synthétique arrive à la conclusion suivante : *„With respect to low flow we see no strong development in the near future; while most ensemble members show no clear tendency in summer (ranging from +/-10%), winter low flow is even projected to be alleviated (0% to +15%). For the far future, the change signal is stronger in summer, with a tendency towards decreased low flow discharges (-25% to 0%), while for winter no clear signal is discernible (bandwidths are mainly from -5% to +20% depending on discharge diagnostic and gauging station)“ (Görgen et al. 2010).*

Les projets « Abflussregime des Rheins » (Belz et al., 2007) et « Rheinblick2050 » (Görgen et al. 2010) ont montré qu'il manquait une quantification fiable des parts que détiennent la fonte des neiges et celle des glaciers dans le débit global du Rhin. Cette lacune a été comblée par le projet de la CHR « Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels » (*parts détenues par la fonte des neiges et celle des glaciers dans le Rhin et ses affluents en regard du changement climatique*) (Stahl et al., 2016). Les parts de débit journalières issues de la fonte des neiges et des glaciers y sont analysées et présentées pour différentes échelles sur l'ensemble du linéaire du Rhin entre 1901 et 2006. Il est ainsi possible de quantifier l'ampleur de ces impacts également sur le régime des étiages.

Les résultats de Görgen et al. (2010) notamment ont été pris en compte dans une étude de scénarios mise au point par le GE KLIMA de la CIPR pour le régime hydrologique du Rhin (CIPR 2011).

Sur la base des évolutions de la température de l'eau et des débits consignées dans l'étude de scénarios sur le régime hydrologique du Rhin, la CIPR a mis au point pour la première fois en 2014 un rapport sur l'estimation des conséquences du changement climatique dans le futur proche (2021-2050) et dans le futur lointain (2071-2100) (CIPR, 2014). Ce rapport complète les publications de la CIPR sur l'évolution des températures de l'eau du Rhin de 1978 à 2011 (CIPR, 2013a) et sur les impacts envisageables de ces évolutions sur les biocénoses aquatiques (CIPR, 2013b). Cette dernière publication montre que pendant les étés particulièrement chauds avec débits d'étiage très faibles, la température des eaux peut augmenter dans une mesure telle que des incidences négatives sur l'écosystème aquatique sont à craindre (CIPR, 2013b).

Par ailleurs, la CIPR a publié les rapports suivants qui font état à la fois des répercussions et des mesures prises lors d'épisodes d'étiage écoulés : Rapport n° 142 « Pressions thermiques sur les eaux pendant l'été 2003. Synthèse des rapports de situation nationaux. » (CIPR, 2004), rapport n° 152 « Mesures relatives aux pressions thermiques sur le Rhin en période de canicule et de sécheresse - résumé des rapports nationaux de situation » (CIPR, 2006) et rapport n° 198 « Périodes d'étiage en 2011 dans le bassin du Rhin » (CIPR, 2012).

Le groupe de travail allemand KLIWA (changement climatique et gestion des eaux) a analysé les étiages et leurs évolutions sur un grand nombre d'échelles au Bade-Wurtemberg, en Bavière et en Rhénanie-Palatinat (groupe de travail KLIWA 2009). Des

projections de débit avec évaluation des paramètres d'étiage ont été réalisées pour le Rhin dans le cadre d'une coopération entre les partenaires de KLIWA et le Land de Hesse (HYDRON, 2015).

Dans Belz (2005) et sur la plateforme d'information Undine ([www.undine.bafg.de](http://www.undine.bafg.de)) (BfG, 2016), on trouve des descriptions d'épisodes d'étiage écoulés dans le bassin du Rhin.

Pour le bassin de la Moselle, les CIPMS (Commissions Internationales pour la Protection de la Moselle et de la Sarre) ont présenté un rapport d'état des lieux sur la problématique des étiages (CIPMS, 2014). Par ailleurs, le projet FLOW MS (CIPMS, 2009-2013) s'est consacré de 2009 à 2013 à la thématique « Gestion des crues et des étiages dans le bassin versant de la Moselle et de la Sarre ». Les CIPMS réalisent actuellement un monitoring des étiages opérationnel et un rapport actualisé des étiages est attendu pour 2018. En outre, la CIPR et les CIPMS se sont concertées dans le cadre de la présente étude de la CIPR.

Pour la Bavière, qui couvre une très grande partie du bassin du Main, une compilation détaillée des données de base allant de la gestion des étiages jusqu'à des mesures dans différents secteurs a été élaborée (BY-LfU, 2016).

La CHR, assistée de l'Office fédéral suisse de l'environnement (OFEV), la CIPR et la Commission Centrale de la Navigation du Rhin (CCNR), c'est-à-dire les trois « Commissions du Rhin », ont organisé le colloque international « Low flows in the Rhine catchment » (Etiages dans le bassin du Rhin) les 20 et 21 septembre 2017 à Bâle qui a réuni 70 participants. L'accent a été mis sur l'échange entre scientifiques et praticiens et le colloque a porté sur les processus hydrologiques et climatiques et sur les paramètres et impacts en relation avec les phénomènes d'étiage. On a ainsi présenté à titre d'exemples les premiers résultats des groupes d'experts 'Etiage' de la CIPR et des CIPMS, de même que les informations rassemblées par la CCNR sur les répercussions des étiages sur la navigation. Le colloque a permis par ailleurs de mettre en avant des exemples de monitoring et de mesures de gestion et de mitigation.

Il est également ressorti clairement du colloque que les étiages du Rhin ne sont pas plus marquants sous l'angle hydrologique qu'il y a un siècle mais qu'ils affectent aujourd'hui plus fortement de nombreux usages (navigation, industrie, agriculture, production énergétique, etc.). On estime que la demande en eau et les répercussions socio-économiques de la ressource en eau augmenteront dans le bassin du Rhin. On peut également s'attendre à ce que les épisodes d'étiage accompagnés de températures élevées de l'eau, soient plus fréquents en été à l'avenir. Les résultats du colloque viennent appuyer les travaux des trois « Commissions du Rhin » concernées. On trouvera d'autres informations sur le site [www.chr-khr.org](http://www.chr-khr.org) (CHR, 2017) et sur le site [www.iksr.org](http://www.iksr.org) (voir « Manifestations »).

Les projets et études susmentionnés fournissent de nombreux résultats et des démarches méthodiques qui ont été pris en compte également dans la présente analyse.

Même si la question des « crues » est toujours prioritaire dans la plupart des autres commissions de bassin européennes, la thématique des étiages (ou de la sécheresse/aridité) est évoquée dans les plans de gestion établis au titre de la DCE, dans les rapports annuels et dans différents documents ou stratégies sur l'impact ou l'adaptation au changement climatique. On citera par exemple la Commission Internationale pour la Protection du Danube (IKSD) avec un article sur la période de sécheresse en 2003 et un rapport détaillé sur les incidences et les impacts de la rareté de l'eau en 2015 sur les usages (sur la base d'une enquête auprès des Etats) ou la Commission Internationale pour la Protection de la Meuse (CIM) qui a organisé un atelier thématique en novembre 2003, auquel ont participé 60 représentants des autorités, du secteur privé, de groupes d'intérêt et d'universités (résultat : introduction d'un système automatique et permanent d'informations hydrologiques et d'annonce en situation d'étiage). La Commission Internationale pour la Protection de l'Elbe (IKSE) consacre son 18<sup>e</sup> séminaire magdebourgeois sur la protection des eaux à la thématique des « étiages et exigences en matière d'usages de l'eau dans le bassin de l'Elbe » (du 18.10 au 19.10.2018 à Prague). De plus, le groupe d'experts en hydrologie de l'IKSE a publié récemment un rapport sur l'épisode d'étiage survenu en 2015 dans le bassin de l'Elbe (IKSE, 2017).

Au niveau européen, la thématique de la pénurie d'eau et de l'aridité, qui est également pertinente pour les étiages, est principalement couverte par la directive cadre sur l'eau (DCE) et ses exigences d'atteinte du bon état chimique et écologique des cours d'eau (eaux de surface et eaux souterraines), compte tenu entre autres des captages d'eau. Ces dispositions devraient être intégrées dans les plans de gestion à établir au titre de la DCE et dans les programmes de mesures correspondants. L'UE a publié en 2007 une communication intitulée « Faire face aux sécheresses et à la rareté de l'eau dans l'Union européenne » (Commission de l'UE, 2007). Des approches détaillées sur la gestion des sécheresses sont présentées dans le « Drought Management Plan Report » (Commission de l'UE, 2008). Y sont mentionnés entre autres les éléments devant obligatoirement se retrouver dans un plan de gestion de la sécheresse : 1) un système d'avertissement précoce de la sécheresse, 2) des indicateurs de sécheresse et des valeurs limites pour différents stades de sécheresse, 3) des mesures qui doivent être prises à ces différents stades pour atteindre des objectifs spécifiques.

Il a été mis en place une stratégie (Commission de l'UE, 2012), un réseau d'experts sur cette thématique (Commission de l'UE, 2008) et un « Observatoire européen de la sécheresse » du Centre de Recherche Commun (CCR)/Joint Research Centre (JRC) de l'UE (JRC 2017, Cammaleri 2017). L'Agence européenne pour l'environnement (AEE, 2009) et différents projets de recherche (DROUGHT-R&SPI, 2015) traitent du sujet. L'« European Drought Impact Inventory » est un inventaire de la sécheresse et des répercussions des épisodes de sécheresse couvrant toute l'Europe. Il contient également des informations sur les épisodes historiques de sécheresse dans le bassin du Rhin (voir aussi le chap. 6.3 et l'annexe ...) (DROUGHT-R&SPI, 2015 ; Kohn, 2017). Dans le cadre de la Common Implementation Strategy (CIS), qui a pour vocation d'assister les Etats membres dans la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau (DCE), quelques rapports techniques intéressants ou guides directeurs ont été élaborés et publiés, par ex. le plan de gestion de la rareté de l'eau (Commission de l'UE, 2008) et le document « Gestion de bassin face au changement climatique » (Commission de l'UE, 2009) qui comporte également des indications sur les étiages.

On citera entre autres à une échelle plus globale le « Manual on Low-flow Estimation and Prediction » (WMO, 2009) et l'Integrated Drought Management Programme (IDMP) (WMO - GWP, 2014) où l'on trouve de précieuses informations sur l'estimation et l'analyse des étiages ainsi que sur la gestion intégrée des épisodes de sécheresse. Dans ce contexte, l'ONU a lancé en 2013 l'initiative « Capacity development to support national drought management policies » (Développement de capacités pour soutenir les stratégies nationales de gestion de la sécheresse) (UN, 2013 ; BY-LfU, 2016). Il s'est tenu en décembre 2017 un atelier UN-ECE intitulé « International Workshop on Water Scarcity: Taking action in transboundary basins and reducing health impacts » (UN-ECE, 2017). Les résultats provisoires du GE LW y ont été présentés à cette occasion.

#### 4. Définitions et démarche

Les étiages dans les cours d'eau naissent de la superposition d'épisodes hydrologiques et météorologiques. Les situations d'étiage se développent principalement sous l'effet d'une période de sécheresse prolongée combinée à une régression du débit des eaux souterraines dans le bassin versant. Les causes à l'origine des étiages sont à voir principalement dans la baisse ou l'absence totale de précipitations ou dans la forte rétention des précipitations sous forme de neige et de glace.

La norme allemande DIN 4049 définit les « étiages » comme un « état d'un cours d'eau de surface dans lequel le niveau d'eau ou le débit atteint une valeur donnée (valeur seuil) ou passe au-dessous de cette valeur ».

Cette définition permet différentes interprétations des étiages et peut donner lieu à des estimations très différentes d'un épisode donné, selon que le niveau d'eau ou le débit est le paramètre intéressant et selon l'usage en présence à un endroit donné. La répercussion est liée à une « valeur seuil » qui correspond soit à une classification hydrologique, soit à une altération progressive d'un usage (par ex. la navigation) lorsqu'elle n'est pas atteinte, soit encore à une valeur limite à respecter impérativement (par ex. dérivation d'eau, captage d'eau). Les Etats ont été priés d'indiquer les vulnérabilités importantes en cas d'étiages dans le Rhin et ces informations ont été rassemblées dans un inventaire. De la même manière, des recherches ont été faites pour

identifier les impacts importants de l'activité humaine sur le régime hydrologique et les étiages et les affecter aux différents tronçons du Rhin.

Les étiages peuvent être décrits à l'aide de différents paramètres et de leur probabilité d'occurrence (voir chap. 5). L'apparition de faibles niveaux d'eau ou débits est une première caractéristique manifeste des étiages, complétée par la durée de l'épisode. Ces paramètres peuvent être déterminés pour différentes périodes de référence (par ex. l'été) ou chroniques et comparés à des moyennes pluriannuelles ou valeurs seuils.

Dans le cadre du présent inventaire comparatif des étiages dans le Rhin, on a analysé des débits qui sont ensuite comparés aux paramètres d'étiage statistiques sous forme de valeurs seuils. Il est ainsi possible de représenter l'ampleur et l'évolution de la survenance d'étiages sur tout le linéaire rhénan. En règle fondamentale, les valeurs seuils de débit et les paramètres d'étiage utilisés peuvent être convertis en hauteurs d'eau par le biais de la relation hauteur d'eau-débit (courbe de tarage) au niveau de l'échelle. Ces niveaux d'eau s'appliquent toutefois uniquement au profil transversal de l'échelle et devraient être reproduits sur un site donné pour identifier des perturbations locales.

Pour déterminer des classes d'étiage (sous forme de valeurs seuils) pour un suivi, les chroniques disponibles ont fait l'objet d'une analyse d'homogénéité avant d'être limitées à une période de référence de 50 ans représentative de l'état actuel. L'approche suivie est exposée au chapitre 5. Au chapitre 7, les classes d'étiage définies ont permis d'analyser rétrospectivement et de représenter les épisodes dans les chroniques.

## 5. Données de base et méthodes

### 5.1 Sélection des stations d'analyse et base de données hydrologiques

L'analyse du GE LW se concentre sur la description et l'analyse des étiages le long du Rhin tout en prenant en compte l'influence des sous-bassins. Pour les différents tronçons du Rhin, entre lesquels les conditions hydrologiques peuvent varier sous l'effet d'affluents importants, on a défini les échelles de référence ci-dessous dont les valeurs sont déterminées par le bassin situé en amont et qui, à l'exception de l'échelle de Diepoldsau, sont représentatives du tronçon du Rhin jusqu'à l'échelle suivante (voir figure 1) :

Echelle de **Diepoldsau** sur le Rhin alpin en amont du lac de Constance

Echelle de **Rekingen** sur le haut Rhin en aval du lac de Constance et de son affluent, la Thur

Echelle de **Bâle** sur le haut Rhin en aval de son affluent, l'Aar

Echelle de **Maxau** sur le Rhin supérieur avec les affluents prenant naissance dans la Forêt-Noire et les Vosges

Echelle de **Worms** sur le Rhin supérieur en aval de son affluent, le Neckar

Echelle de **Mayence** sur le Rhin supérieur en aval de son affluent, le Main

Echelle de **Kaub** sur le Rhin moyen en aval de son affluent, la Nahe

Echelle d'**Andernach** sur le Rhin moyen en aval de ses affluents, la Lahn et la Moselle

Echelle de **Cologne** sur le Rhin inférieur en aval de ses affluents, l'Ahr et la Sieg

Echelle de **Lobith** sur le Rhin inférieur en aval de ses affluents, la Wupper, l'Erft, la Ruhr et la Lippe jusqu'à la frontière germano-néerlandaise. En aval de Lobith, l'eau se répartit sur 3 bras du Rhin aux Pays-Bas.

Ces échelles de référence sont des échelles hydrologiques (échelle avec évaluation du débit) pour lesquelles on dispose de chroniques de débit (débits mesurés ou débits calculés à l'aide du niveau d'eau) (voir figure 1). Etant donné que les débits moyens journaliers sont généralement examinés dans les analyses des étiages et que ceux-ci affichent une résolution temporelle suffisamment élevée du fait de la taille des bassins correspondant aux échelles du Rhin, on a créé une base de données comportant les

débits moyens journaliers entre 1900 et 2015, pour autant que les données soient disponibles. Pour l'échelle de Diepoldsau, les données ne sont disponibles qu'à partir de 1919. Elles le sont seulement à partir de 1931 pour l'échelle de Mayence.

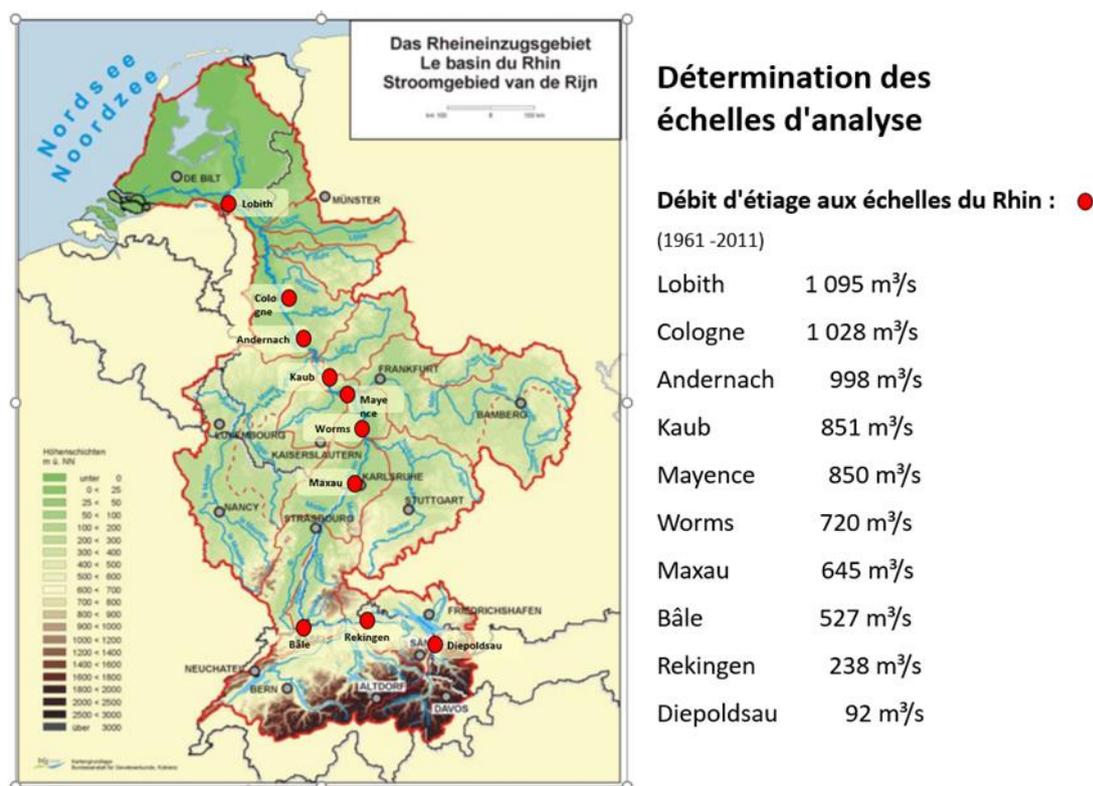


Figure 1 : localisation des échelles d'analyse sur le Rhin, y compris débit d'étiage moyen pluriannuel sur 7 jours consécutifs (MNM7Q) (modifiée d'après Bundesanstalt für Gewässerkunde - BfG)

## 5.2 Paramètres d'étiage

L'ampleur d'un épisode d'étiage est caractérisée d'une part par un faible débit et d'autre part par la durée des faibles débits et représentée par un hydrogramme. Pour les analyses statistiques et les essais comparatifs, il est nécessaire de disposer de paramètres déterminés à partir des hydrogrammes et décrivant les étiages. Sur la base des débits moyens journaliers durant les périodes de référence respectives, il est tenu compte du plus faible débit moyen journalier sur une période à considérer (de 1901 à aujourd'hui) (**NNQ**), du plus faible débit moyen journalier dans une période de référence (**NQ**) ou du plus faible débit moyen journalier sur un nombre donné d'années (**MNQ**). Pour limiter dans l'analyse les effets perturbateurs de valeurs moyennes journalières influencées ou erronées, les paramètres sont déterminés sur plusieurs jours consécutifs. Une valeur usuelle est par ex. la plus faible moyenne arithmétique sur 7 jours consécutifs ou VCN7 (**NM7Q**) dans une période de référence (par ex. une année). Dans cette analyse, le **MNM7Q** a été utilisé comme valeur seuil pour une longue période homogène (voir figure 1 et chapitre 5.3).

La durée d'un épisode d'étiage est déterminée par le nombre de jours pendant lesquels une valeur seuil  $Q_s$  (à fixer) n'est pas atteinte. Cette valeur seuil peut être prescrite par un usage local ou définie par des paramètres hydrologiques statistiques pour des analyses comparatives. Pour le paramètre de durée de l'épisode d'étiage, on distingue la durée ininterrompue la plus longue pendant laquelle une valeur seuil n'est pas atteinte dans un espace de temps donné (**MaxD**) et la somme de toutes les durées de non-atteinte d'une valeur seuil dans l'espace de temps donné (**SumD**) (DVWK, 1983).

Un paramètre d'étiage plus complexe est défini comme déficit de débit (DVWK, 1983). On entend par là le plus grand débit faisant défaut entre une valeur seuil  $Q_s$  et un hydrogramme dans un espace de temps donné (**MaxV** [m<sup>3</sup>]) ou la somme de tous les débits faisant défaut entre une valeur seuil et un hydrogramme (**SumV** [m<sup>3</sup>]).

On a pris comme durée de référence pour les paramètres d'étiage « l'année hydrologique » du 1<sup>er</sup> avril au 31 mars de l'année suivante pour ne pas interrompre, dans le cadre de la détermination de séries annuelles, les épisodes d'étiage se produisant en fin d'automne ou en hiver et pour éviter, le cas échéant, de prendre en compte leurs valeurs sur deux années consécutives.

Dans le cas de répercussions locales, il est également possible de déterminer les paramètres d'étiage sur la base de hauteurs d'eau au lieu de débits. Ils ne sont toutefois pas comparables avec d'autres échelles de référence (sur les rivières/fleuves).

### 5.3 Méthodes d'évaluation et d'analyse

Pour analyser les étiages, on a utilisé des méthodes statistiques classiques et des méthodes d'analyse des étiages publiées dans des ouvrages réglementaires (DVWK, 1983 ; DVWK, 1992). Les analyses statistiques et la formation antérieure de chroniques et de séries de paramètres ont été réalisées avec le programme HyStat de l'Institut für angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik - IAWG (institut de gestion appliquée des eaux et de géo-informatique).

Après contrôle de plausibilité et correction éventuelle des données rassemblées, des **séries annuelles** des paramètres d'étiage  $NM_xQ$  ( $x = 1, 3, 7, 21, 60$ ) ont été déterminées à partir de toutes les chroniques d'échelle. Pour ce faire, on a filtré pour chaque année le plus faible débit moyen d'étiage sur  $x$  jours consécutifs. La moyenne arithmétique formée à partir des paramètres annuels donne alors le paramètre d'étiage  $MNM_xQ$  ( $MNQ, MNM3Q, MNM7Q, MNM21Q$  et  $MNM60Q$ ) pour les différentes durées d'étiage à chaque échelle (par ex. « **débit d'étiage moyen interannuel** sur 7 jours consécutifs »  $MNM7Q$ ).

Des **analyses de rupture** ont été réalisées avec les séries de valeurs  $NM_xQ$  pour déterminer si les valeurs changeaient à un moment donné dans la série. Dans les méthodes appliquées par Bernier et Pettit, on recherche un moment où le caractère statistique d'une chronique change. Le point de rupture déterminé partage une chronique en deux sous-chroniques se comportant de manière significativement différente. Sur la base des résultats de l'analyse de rupture et de la représentation graphique de la caractéristique temporelle des paramètres, il a été déterminé une période de référence pour l'état actuel (1961-2010) à partir de toute la période analysée (1901-2015).

Pour analyser la **durée des étiages**, des séries des sommes absolues de jours par an et du nombre maximal de jours consécutifs par an pendant lesquels une valeur seuil  $Q_s$  n'est pas atteinte sont formées à partir des chroniques de débits moyens journaliers. Le paramètre  $MNM7Q$  et les valeurs  $NM7Q$  de différentes probabilités d'occurrence de l'échelle respective ont été choisis comme valeur seuil, de sorte que la durée des étiages peut être directement comparée sur toutes les échelles du Rhin.

Les **analyses des tendances** permettent d'analyser la présence de tendances à la hausse ou à la baisse dans le régime des étiages. Les chroniques temporelles ont été analysées quant à l'importance d'une tendance linéaire par adaptation d'une droite de tendance via la minimisation de « l'erreur standard de prédiction ». Le contrôle de signification (probabilité d'erreur de 5 %) a été réalisé avec le test de Mann-Kendall (non paramétrique) et le test  $t$  du coefficient de pente des droites.

Pour pouvoir classer l'ampleur des débits et des durées d'étiage (intervalles des étiages) quant à leur **probabilité d'occurrence**, les données ont été soumises à une analyse statistique des valeurs extrêmes. Les valeurs des séries annuelles de paramètres d'étiage pour une distribution de probabilité théorique ont été ajustées pour la période de référence (1961-2010) et les quantiles correspondants ont été déterminés pour un épisode  $T$  ( $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100$  ans). Une **analyse de probabilité classique** a été réalisée pour les paramètres d'étiage  $NM_xQ$  pour lesquels on disposait d'une valeur pour chaque année. Etant donné qu'il existe, pour les durées d'étiage, différentes valeurs annuelles pour lesquelles la valeur seuil n'est pas atteinte et que la valeur zéro est affectée à ces années, ces séries ne peuvent pas être adaptées avec les fonctions de répartition hydrologiques utilisées habituellement. On a donc utilisé la **méthode indirecte** selon DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.) (DVWK, 1992) pour l'analyse de probabilité des durées des étiages. Pour ce faire, la

durée de non-atteinte de la valeur seuil au cours des différentes années a été déterminée pour toute une gamme de valeurs seuils. On peut ainsi obtenir pour chaque durée de non-atteinte de la valeur seuil un échantillon des valeurs seuils correspondantes  $Q_s$  dont les éléments sont supérieurs à zéro. Une fois qu'une fonction de répartition est adaptée, les valeurs seuils peuvent être déterminées dans un premier temps en fonction de la période de retour  $T$  et de la durée de non-atteinte de la valeur seuil  $D$ . A partir de là, le paramètre intéressant de la durée de non-atteinte de la valeur seuil  $D$  peut être déterminé comme fonction inverse en relation avec la valeur seuil  $Q_s$  et la période de retour  $T$ .

## 6. Inventaire

### 6.1 Conditions hydrologiques dans le bassin du Rhin

Le régime hydrologique désigne l'ensemble des variations de débit d'un cours d'eau rapportées à une moyenne interannuelle ainsi que les évolutions caractéristiques des crues et des étiages extrêmes (Belz et al., 2007). Différents régimes hydrologiques se superposent dans le bassin du Rhin (voir figure 2).

Le tronçon méridional, proche des Alpes (échelle de Bâle) est influencé par l'alternance d'une rétention d'eau par formation d'un revêtement neigeux en hiver et d'une fonte de neige et des précipitations relativement abondantes en été (« régime nival »). Il en résulte l'apparition de **situations d'étiage principalement en hiver** et de crues principalement en été.

Un « régime pluvial » caractérise quant à lui les rivières drainant les eaux des zones de hautes terres (Neckar, Main, Nahe, Lahn, Moselle etc. ; échelle de Trèves). Ici, les crues dominent en hiver et les **étiages en été**.

La superposition de ces deux régimes **régularise progressivement** dans la partie plus en aval du Rhin **la répartition du débit sur l'année** (« régime combiné » ; échelle de Cologne).

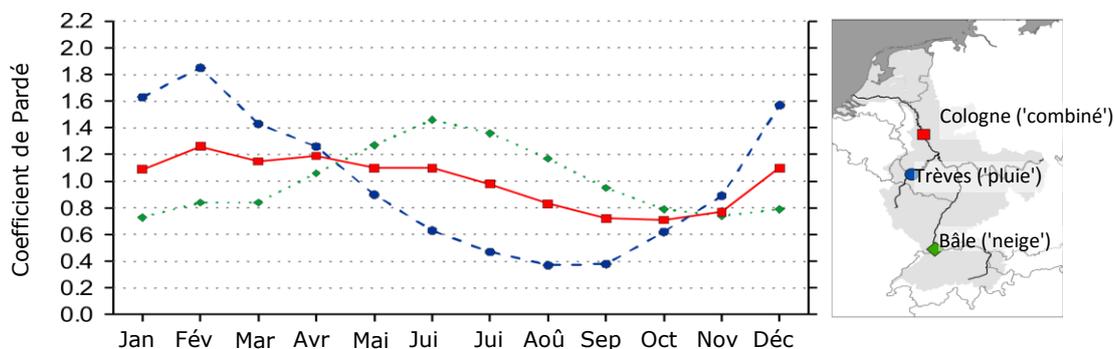


Figure 2 : Régime hydrologique typique du bassin du Rhin selon Pardé<sup>1</sup> ; période de référence 1961-1990 (CIPR, 2011)

Les apports quantitatifs des différents sous-bassins du Rhin sont essentiels pour déterminer le régime naturel d'étiage (voir également chap. 7.1). Ainsi, les débits pluriannuels moyens d'étiage de l'espace alpin et préalpin mesurés à l'échelle de Bâle représentent encore presque les deux tiers du débit d'étiage à hauteur de l'échelle de Lobith après débouché du Neckar dans le Rhin. Les paramètres d'étiage à l'échelle de Mayence en aval du débouché du Main sont encore dominés à raison d'environ deux tiers par le débit transitant à l'échelle de Bâle, qui entre encore pour moitié dans la constitution du débit d'étiage au niveau de l'échelle de Lobith. L'apport de base des débits d'étiage moyens est donc fourni par l'espace alpin et préalpin (en particulier par le régime hydrologique et l'impact des lacs subalpins). Les grands affluents rehaussent par leur afflux les paramètres d'étiage de 12 % (Neckar) à 18 % (Main et Moselle en moyenne). Les situations d'étiages prononcés surviennent donc quand les débits alpins et préalpins régressent à partir des mois de septembre et octobre et pendant les hivers secs

<sup>1</sup> Coefficient de Pardé = rapport du débit mensuel moyen au débit interannuel moyen.

(ou très froids avec rétention dominante des précipitations dans la couverture neigeuse) dans les bassins à régime pluvial.

Pour les épisodes d'étiages estivaux sur le Rhin, un impact à ne pas négliger est celui des pourcentages variables de la fonte des neiges et des glaciers. En plus des apports de débits significatifs à mettre sur le compte de la fonte des neiges, la fonte des glaciers a une importance notable dans le soutien des apports d'eau au cours des phases d'étiages extrêmes survenant vers la fin de l'été sur le Rhin moyen et le Rhin inférieur (Stahl et al., 2016). Ces apports d'eau de fonte des glaciers peuvent représenter, en termes de pourcentage maximum, jusqu'à un tiers du débit journalier à Bâle et à un cinquième de celui transitant à Lobith dans le cas d'un étiage tel que celui de 2003. En revanche, l'impact de la fonte des glaciers est faible au niveau de Lobith dans des conditions de débits moyens (< 2 %).

## **6.2 Inventaire des influences sur les débits (prélèvements, apports d'eau, dérivations, rétention et restitution différée de l'eau)**

Il est difficile de faire une distinction entre les impacts anthropiques sur les étiages et les variations naturelles des paramètres hydrologiques. On peut dire en général que les modifications des étiages sont dues directement à la gestion des ouvrages de rétention, aux prélèvements et aux apports d'eau ou indirectement aux modifications des usages dans le bassin (LAWA, 2007 ; Belz et al., 2007). Ce chapitre englobe un relevé des impacts anthropiques, basé sur un recensement auprès des Etats et sur des rapports relatifs à des épisodes d'étiage écoulés ainsi que sur des études bibliographiques (voir figure 3). La présente analyse se concentre sur les impacts directs et laisse de côté les impacts indirects (occupation des sols, sylviculture, agriculture, usages spéciaux tels que l'exploitation minière, etc.) qui sont difficiles à quantifier.

La figure 3 illustre schématiquement les principaux prélèvements et apports d'eau sur le Rhin et dans son bassin (source : informations des Etats, CIPR (document interne, 2017).

### **Gestion des ouvrages de rétention**

La gestion des ouvrages de rétention, qui affiche une dynamique saisonnière de redistribution et de compensation en période d'excédent d'eau et de vidange des ouvrages, constitue une influence anthropique importante et contribue de manière décisive à faire baisser la variabilité des débits alors que celle des précipitations augmente. C'est notamment le cas en amont de Bâle avec le développement des barrages réservoirs (volume de rétention de plus d'1,8 milliard de m<sup>3</sup> au total) entre le début du siècle passé et les années 1960 (cf. figure 3). En dehors de la région alpine, la gestion des ouvrages de rétention est caractérisée par des objectifs de gestion nettement moins uniformes et son importance comme facteur d'influence baisse pour le Rhin. Au-delà de ces effets, les barrages de vallée représentent toujours des plans d'eau artificiels de grande étendue où l'évaporation est élevée. Par rapport à la situation initiale, la mise en retenue de lacs artificiels, la construction de canaux et les retenues fluviales peuvent entraîner des recharges plus importantes de la nappe souterraine (LAWA, 2007; Belz et al. 2007). Les volumes de rétention (c'est-à-dire l'espace de rétention et/ou la capacité de rétention d'eau) des lacs de retenue dans le bassin du Rhin sont listés dans le tableau 1. Le mode de gestion actuel du bassin du Rhin en zone alpine se traduit par une restitution des débits décalée dans le temps, ce qui a pour effet de les faire augmenter d'environ 120 m<sup>3</sup>/s, notamment en période d'étiage, pendant les hivers hydrologiques souvent caractérisés par de faibles débits (Weingartner, 2017).

Tableau 1 : volumes de rétention des lacs de retenue dans le bassin du Rhin (modifié selon Wildenhahn &amp; Klaholz, 1996 dans Belz et al. 2007)

Tronçon du Rhin / Affluent	Volume [en millions de m <sup>3</sup> ]	Volume total [en millions de m <sup>3</sup> ]
Rhin antérieur	253,14	253,14
Rhin postérieur	289,36	542,50
Tamina	38,50	581,00
Ill (A)	183,40	764,40
Bregenzerach	8,40	772,80
Lac de Constance	1,40	774,20
Thur	0,60	774,80
Haut Rhin (Ch)	7,26	782,06
Aar	496,95	1279,01
Reuss	153,19	1432,20
Limmat	314,86	1747,06
Haut Rhin (D)	112,85	1859,91
Rhin supérieur	27,63	1887,54
Ill (F)	24,29	1911,83
Neckar	37,99	1949,82
Main (y compris système de retenue du transfert Danube-Main depuis 2000. + 64 millions de m <sup>3</sup> )	180,00	2129,82
Nahe	14,05	2143,87
Lahn	6,63	2150,5
Moselle (F)	103,58	2254,08
Moselle (D ; sans la Sûre)	50,53	2304,61
Sûre (affluent de la Moselle)	71,40	2376,01
Wied	4,45	2380,46
Ahr	0,73	2381,19
Sieg	123,10	2504,29
Wupper	140,43	2644,72
Erft	51,00	2695,72
Ruhr	496,06	3191,78
Lippe	50,01	3241,79

### Prélèvements et apports d'eau

Les prélèvements directs, les apports d'eau et la restitution d'eau utilisée comptent parmi les mesures anthropiques impactant directement les débits. On citera notamment l'utilisation de l'eau pour la production d'eau potable, pour l'irrigation ou pour le refroidissement d'usines thermiques. En transférant de l'eau vers d'autres bassins fluviaux, il est possible en outre d'en retirer dans le bassin d'origine. De tels transferts d'eau de grande ampleur existent par ex. sur le Neckar (transfert d'eau potable à partir du lac de Constance) et sur le Main (transfert depuis le bassin du Danube depuis le milieu des années 1990, notamment via le système de transfert Danube-Main, via le canal Rhin-Main-Danube et en soutien d'étiage pour la Regnitz, ce dont profite également le Main) (Belz et al., 2007).

Le schéma de la figure 3 illustre les principaux prélèvements et apports d'eau dans le Rhin et son bassin (source : informations des Etats, CIPR (document interne), 2017/2018). Environ 2 m<sup>3</sup>/s sont retirés du bassin par des transferts d'eau vers le bassin du Tessin. De même, quelque 3 m<sup>3</sup>/s sont ponctionnés sur le bassin de l'Aare pour alimenter le bassin du Rhône. A l'opposé, le bassin du Rhin gagne un peu moins de 8 m<sup>3</sup>/s par transfert d'eau à partir du bassin de l'Inn. Les prélèvements d'eau dans le lac de Constance aux fins d'approvisionnement en eau de zones éloignées sont restitués en très grande partie au Rhin par des apports d'eaux usées en aval du débouché du Neckar. Les prélèvements ponctuels et limités dans le temps dans la plaine du Rhin supérieur septentrional, qui peuvent atteindre jusqu'à 6,3 m<sup>3</sup>/s, sont destinés à l'irrigation et à la recharge de la nappe souterraine par infiltration. Jusqu'à 15 m<sup>3</sup>/s sont apportés au Rhin à partir du bassin du Danube (eau de l'Altmühl et du Danube, crues stockées de

l'Altmühl) par le biais du Main et ont pour but de soutenir les débits d'étiage<sup>2</sup> de la Redniz, de la Regnitz et du Main (voir figure 4). Par ailleurs, jusqu'à 0,9 m<sup>3</sup>/s d'eau potable produits dans les installations dans la zone de débouché du Lech sont acheminés vers le bassin du Main. Il n'y a pas de prélèvement ou d'apport d'eau significatif plus en aval entre Mayence et Lobith. Le delta du Rhin commence en aval de Lobith. Le fleuve se divise rapidement en trois bras. A hauteur du Pannerdensche Kop, le Rhin se sépare, formant d'une part le Waal et d'autre part le canal de Pannerden qui devient le Nederrijn après quelques kilomètres, puis se divise à nouveau à hauteur d'Arnhem, donnant naissance à un nouveau bras, l'IJssel. En fin de parcours, le Nederrijn et le Waal débouchent dans la mer du Nord, tandis que l'IJssel s'écoule dans l'IJsselmeer. L'excédent d'eau de l'IJsselmeer est évacué dans la mer des Wadden par des écluses.

Les flux d'eau susmentionnés, notamment les prélèvements aux fins d'irrigation et les transferts d'eau à partir du bassin du Danube dans celui du Rhin, ne surviennent pas tous simultanément et régulièrement, mais il ressort de leur addition que le bilan est globalement positif pour le Rhin. Ce bilan positif est encore à compléter par le soutien aux débits d'étiage hivernaux, sensiblement plus important encore en termes de quantité, obtenu par gestion des retenues dans les zones alpines (voir plus haut).

---

<sup>2</sup> Remarque : le transfert d'eau du Danube vers le Main ne se fait pas seulement en période d'étiage mais varie sur toute l'année. Le transfert a entre autres pour objectif de pallier les perturbations qui pourraient affecter le développement économique en Franconie (mise à disposition suffisante d'eau et, par là-même, soutien de la qualité de l'eau).

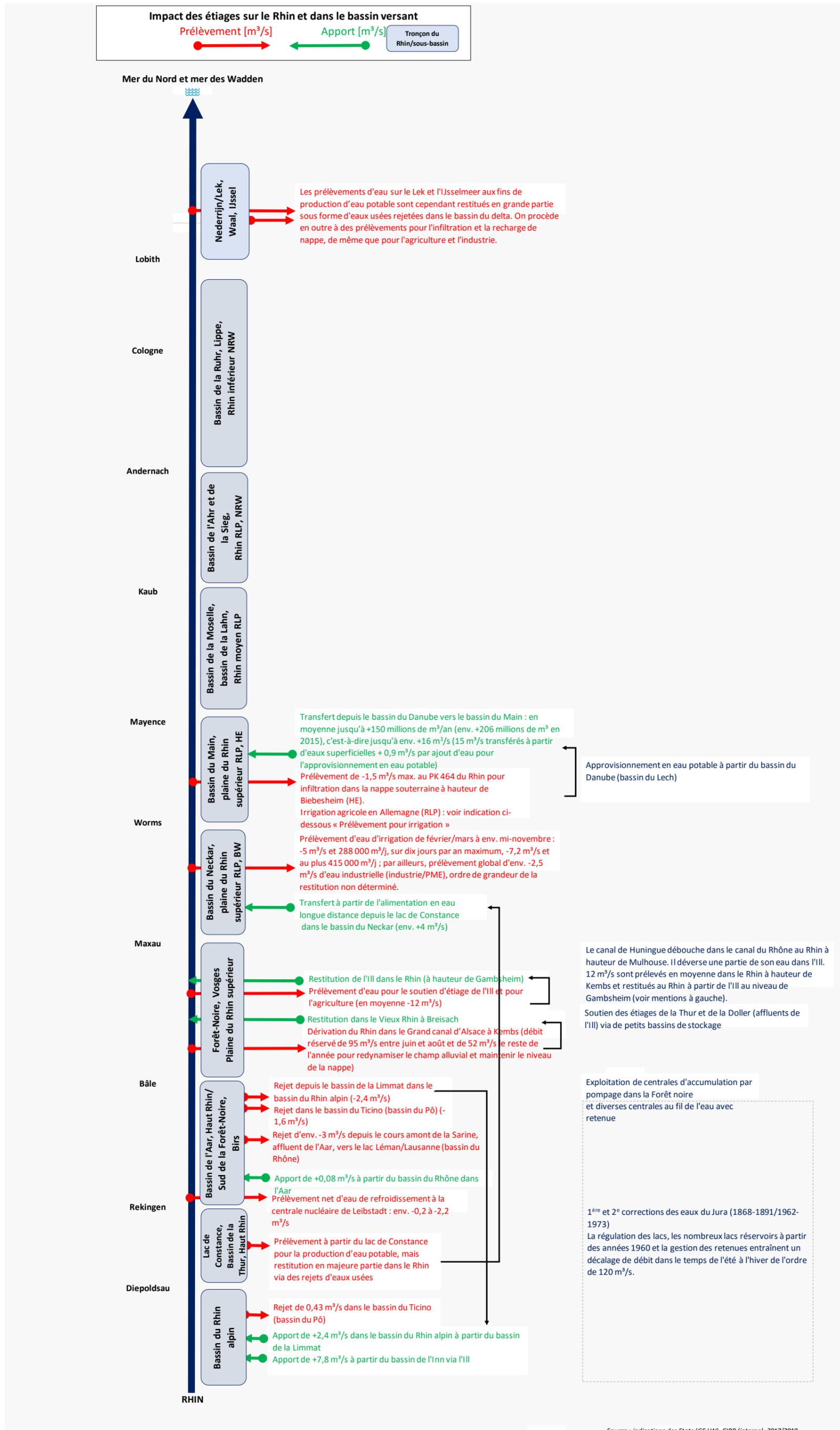


Figure 3 : principaux prélèvements et apports d'eau dans le Rhin et dans son bassin



Figure 4 : système de transfert Danube-Main (StMUV, 2011)

### 6.3 Inventaire des vulnérabilités face aux étiages dans le Rhin

Les faibles niveaux d'eau et les faibles débits sont, tout comme les crues, des phénomènes naturels et normaux qui sont inévitables. Les étiages accompagnés d'un réchauffement important des eaux sont susceptibles d'avoir un effet perturbateur sur l'écosystème du fait de l'abaissement du transport d'oxygène (débit faible en combinaison avec une concentration plus basse d'oxygène consécutive à une hausse de température).

Des débits et niveaux d'eau faibles peuvent entraver fortement le trafic fluvial sur le Rhin et les performances des usines hydroélectriques. Les répercussions des étiages peuvent se décliner comme suit :

- impacts sur la qualité de l'eau et de l'écosystème
- impacts affectant les usages

La figure 5 montre sous forme synthétique les différents usages pouvant être impactés ou perturbés de manière qualitative ou quantitative par les étiages.



Figure 5 : Schéma simplifié des liens de causes à effets des étiages sur les utilisations de l'eau (Arbeitskreis KLIWA, 2017)

Même si les vulnérabilités des usages peuvent varier selon les régions et les saisons, la CIPR a recensé une série d'impacts des étiages sur ces usages (source : indication des Etats, CIPR (document interne) en exploitant en partie les indications mentionnées à ce sujet sur des épisodes d'étiage passés (notamment ceux de 2003 et 2011) (CIPR, 2004, 2006 et 2012). La synthèse de l'European Drought Impact Inventory (EDII) sur les répercussions des étiages de 2003 et de 2011 dans le bassin du Rhin reflète les informations fournies par les Etats dans le cadre de la CIPR sur ces deux événements (étendue, effets, vulnérabilités et répercussions...) (Kohn, 2017) (cf. annexe1). On constate entre autres que l'épisode de 2003 a eu des répercussions beaucoup plus prononcées et étendues (également dans le bassin) que celui de 2011 étant donné que les impacts se sont limités au Rhin (voir annexe 1).

Au niveau transfrontalier, l'accord sur le prélèvement d'eau à partir du lac de Constance pour l'alimentation en eau potable, les impacts du débit du Rhin pour les riverains aval et la navigation ont une importance majeure pour le Rhin comme corridor international.

### 6.3.1 Impacts sur la qualité de l'eau et sur l'écologie

#### Qualité de l'eau

Différents aspects ayant trait à l'écologie fluviale sont importants en cas d'étiages estivaux. La température est un paramètre important pour la qualité de l'eau : elle est déterminante pour la vitesse de tous les processus chimiques et biochimiques, a un impact sur la solubilité des substances et joue un rôle important pour l'équilibre physico-chimique dans l'eau ainsi que dans les phénomènes d'autoépuration (CIPR, 2013, 2015). L'augmentation de la température de l'eau abaisse la solubilité de l'oxygène. Or, la demande en oxygène augmente dans le même temps pour les processus chimiques et biologiques. En période d'étiage, ces deux effets opposés peuvent générer des crises. Quand les débits sont faibles, l'effet de dilution s'amenuise et les concentrations des substances contenues dans les eaux usées (épurées) d'origine ponctuelle (substances biodégradables, nutriments et substances polluantes, sels et agents pathogènes) augmentent par conséquent. En période de sécheresse météorologique ou de stockage solide des précipitations, l'absence de ruissellement se traduit en revanche par une réduction des apports diffus. Lors d'épisodes d'étiage passés, il n'a pas été identifié d'impacts négatifs graves et prolongés sur la qualité des eaux du **cours principal** du Rhin. En général, la pression due aux substances a sensiblement baissé grâce à la construction de stations d'épuration urbaines et industrielles à grande échelle au cours des dernières décennies. Des concentrations polluantes ou des niveaux d'oxygène critiques sont rarement atteints. Ce bilan fondamentalement positif a été conforté, par ex. en 2003 également, par le manque de précipitations, ce qui a permis d'éviter les apports de polluants drainés à partir des surfaces (érosion et lessivage entre autres) et les apports provenant des déversoirs d'eaux mixtes. En plus des effets dus au manque de dilution, comme les hausses de concentration par ex., le réchauffement et l'ensoleillement intense en 2003 ont entraîné en revanche le développement massif d'algues, du moins dans le haut Rhin. L'activité de photosynthèse algale a causé des sursaturations d'oxygène et des précipitations calcaires visibles (décalcification biogène). Les **affluents canalisés** se réchauffent plus fortement à cause des faibles vitesses d'écoulement et peuvent connaître des situations d'oxygénation critiques en combinaison avec les pollutions résiduelles des rejets d'eaux usées. Sont menacées en premier lieu les zones situées directement en aval de rejets d'eaux usées, comme en 2003 où ont été localement constatées des mortalités de poissons (voir plus bas). Quand les périodes d'étiage se prolongent, les risques d'intrusion saline d'eau de mer dans les eaux de surface à partir des eaux souterraines augmentent, de même que ceux d'affaissement des sols dans les polders de l'ouest des Pays-Bas. Cette salinisation constitue une sérieuse menace pour la qualité de l'eau et pour l'écologie.

## Ecologie

Les étiages, ressentis par l'homme comme des événements perturbateurs et parfois inquiétants, sont des phénomènes le plus souvent naturels survenant au cours de l'année, qui sont caractéristiques des écosystèmes fluviaux et qui sont essentiels pour leur fonctionnement. De nombreuses espèces ont développé des stratégies spécifiques de survie et d'adaptation pour y faire face. Il peut cependant arriver dans les cours amont de petites rivières que des espèces moins mobiles soient affectées par l'assèchement de leur milieu (par ex. les peuplements de moules (perlières) d'eau douce). Sur le Rhin même, des milieux écologiques de grande valeur comme certains champs d'épis et surfaces plates situées en retrait du chenal de navigation peuvent s'assécher en période d'étiage et des zones de débouché d'affluents peuvent être déconnectées du fleuve. Il en résulte une accessibilité restreinte de ces structures biotopiques importantes (berges ombragées ou protégées du courant) ou une montaison plus difficile des poissons migrateurs dans les affluents. L'impact écologique majeur reste cependant celui de la température de l'eau, car les possibilités de réaction à ce phénomène sont très limitées. Pour la faune et la flore, la température est un des principaux facteurs environnementaux, car elle règle entre autres la reproduction, la croissance, le développement et la migration. Les organismes à sang froid (poïkilothermes) tels que les poissons et les macroinvertébrés, qui ne contrôlent pas leur température corporelle mais l'adaptent constamment au milieu ambiant, sont particulièrement touchés par les hausses prolongées, voire même durables, de la température de l'eau (voir rapports CIPR, 2013, 2015, 2017). Quand les températures sont élevées, leurs besoins en énergie et en oxygène augmentent alors que baisse le taux d'oxygène dans l'eau. Le métabolisme de ces organismes est alors si fortement stimulé qu'ils ne trouvent plus suffisamment d'alimentation et commencent à puiser dans leurs ressources de graisse pour approvisionner leur corps en énergie, ce qui génère du stress et une plus grande vulnérabilité face aux maladies.

On rapporte ainsi notamment des mortalités de poissons et de bivalves (déclin de la palourde asiatique, une espèce exotique, observé du Rhin supérieur jusqu'en Rhénanie-du-Nord-Westphalie) en 2003 en raison de températures d'eau surélevées en relation avec une dégradation des habitats.

En Suisse, on a relevé une mortalité massive des ombres dans le haut Rhin et dans le lac inférieur du lac de Constance. Il a fallu délocaliser de nombreux poissons à partir de petites rivières. De grandes quantités d'anguilles ont péri dans le Rhin en Suisse et en Allemagne (vibriose). Il n'a pas été constaté en France d'effets négatifs étendus sur la faune piscicole, exception faite de quelques cas locaux de mortalité de poissons. Aux Pays-Bas, on a relevé une très forte croissance d'algues (entre autres des cyanophycées) et de plantes aquatiques dans les eaux (prolifération herbeuse) ainsi que des cas de botulisme (chez les oiseaux d'eau). On note depuis quelques années dans le Rhin et ses affluents une modification très prononcée des biocénoses due à l'immigration d'espèces exotiques, phénomène favorisé par les usages anthropiques. Des températures d'eau plus élevées (notamment en hiver) peuvent faciliter l'implantation de certaines espèces ou leur apporter un avantage compétitif leur permettant de développer leurs populations. On suppose que la propagation de ces espèces a généralement pour conséquence une dégradation de l'état écologique défini par la DCE.

Grâce à l'amélioration de la qualité de l'eau et de la résilience de la flore et de la faune, il n'a globalement pas été constaté dans le bassin du Rhin d'impacts ou de dommages écologiques graves et pérennes lors d'épisodes d'étiage écoulés.

### 6.3.2 Impacts sur les usages

Les dommages économiques causés par les restrictions des usages liées aux épisodes d'étiage sont parfois difficiles à quantifier. Selon la durée, l'extension spatiale et les circonstances régionales, les étiages peuvent toutefois avoir des impacts négatifs sur les usages et déclencher des dommages économiques importants (LAWA, 2007). Le bassin du Rhin est soumis à une exploitation intense et de nombreux acteurs et usages sont touchés par des étiages prononcés, entre autres l'alimentation en eau, la navigation, la production énergétique, l'industrie, l'agriculture, les loisirs et la sécurité.

#### Approvisionnement en eau

A l'échelle locale, les périodes de sécheresse peuvent provoquer des restrictions d'usage et des difficultés d'approvisionnement en eau potable. C'est notamment le cas là où l'approvisionnement en eau se fait principalement à partir de masses d'eau de surface et/ou de réserves d'eau souterraine sensibles. En fonction de l'intensité de l'épisode d'étiage, des restrictions temporaires peuvent s'appliquer aux prélèvements d'eaux de surface et souterraines dans certaines régions. Ces restrictions concernent entre autres l'arrosage des pelouses et espaces verts, l'irrigation des cultures agricoles, de même que les prélèvements et rejets d'eau d'entreprises industrielles spécifiques. Aux Pays-Bas, les eaux de surface sont salinisées par intrusion d'eau de mer, ce qui peut entraîner l'arrêt du captage d'eau pour la production d'eau potable ou du prélèvement d'eau d'irrigation des cultures agricoles. En temps normal, l'afflux d'eau douce du fleuve agit comme une barrière naturelle pour empêcher l'intrusion d'eau salée. En situation d'étiage, la quantité d'eau douce disponible ne suffit pas toujours à empêcher l'intrusion d'eau salée et celle-ci peut alors progresser vers l'est et l'intérieur des terres. Certains usages vulnérables, le captage d'eau potable entre autres, peuvent en souffrir (Beijk, 2017).

#### Navigation

La navigation (navigation intérieure sur le Rhin et ses affluents) peut être vue comme l'une des utilisations transfrontalières les plus touchées quand se produisent des étiages. Les faibles niveaux d'eau lui imposent de fortes restrictions, par ex. dans les fleuves à écoulement libre, quand le chenal de navigation devient moins profond et plus étroit. Une telle situation se produit également dans une moindre mesure dans les affluents régulés et dans les canaux, ce qui peut empêcher la bonne gestion des écluses quand les débits sont extrêmement faibles. Il en résulte que la navigation intérieure doit réduire les cargaisons, ce qui a d'autres conséquences négatives sur l'économie. Le volume global de transport de la navigation fluviale baisse alors et une partie se reporte sur d'autres modes de transport (la part de marché de la navigation baissant du fait de ce désavantage compétitif). En outre, les coûts augmentent pour les affréteurs quand leur flotte ne peut pas être utilisée de manière optimale (notamment les bateaux de grande capacité). Un des principaux atouts de la navigation fluviale, celui des avantages économiques que procurent de grandes capacités de charge, est alors pratiquement néant en situation d'étiage.

Outre la navigation de fret, les bateaux de passagers (voir aussi « Tourisme, loisirs et détente ») et les bacs peuvent également être touchés quand les bateaux ne peuvent plus atteindre leurs embarcadères en raison de niveaux d'eau trop bas.

#### Production d'énergie

Une baisse de débit signifie obligatoirement une baisse d'énergie produite par les centrales au fil de l'eau. Les rejets thermiques (eaux de refroidissement et eaux industrielles) dans les eaux étant soumis à certaines restrictions, il faut parfois freiner la production des centrales (centrales nucléaires, centrales au charbon, etc.). Des autorisations spéciales permettent temporairement une température de rejet plus élevée et provoquent ainsi des températures mixtes dans les eaux plus élevées qu'à la normale.

## Industrie

Les étiages peuvent également affecter l'industrie de transformation et le commerce et sont susceptibles d'entraîner des dommages économiques importants.

Quand les périodes d'étiage se prolongent, le transport par voie navigable limité (voir le paragraphe « navigation ») entraîne des difficultés d'approvisionnement par ex. de charbon, de produits pétroliers liquides (mazout, carburant, etc.), de minerais et de matières premières agricoles.

## Agriculture

Les faibles précipitations et la forte évaporation due aux températures élevées peuvent impacter négativement l'agriculture. En 2003, les autorités ont émis par ex. des restrictions régionales ou des interdictions de prélèvements d'eau dans de petits cours d'eau, menant ici et là à des conflits d'intérêt avec des agriculteurs.

Si ce type de situation peut faire sensiblement baisser la production végétale (par ex. les cultures de fourrage, de céréales et de légumes), il peut être avantageux pour la viticulture (meilleure qualité des vins pour un rendement plus faible).

En 2011, la salinisation des eaux de surface dans l'ouest des Pays-Bas (teneurs élevées en chlorures dues à l'intrusion d'eau marine) a menacé les récoltes et il a fallu prendre des mesures de lutte en maintenant le niveau d'eau dans les polders.

## Tourisme, loisirs et détente

Dans le tourisme, les loisirs et la détente, les périodes de sécheresse et les étiages peuvent avoir des effets négatifs et positifs. Les impacts négatifs sur l'écologie et les peuplements piscicoles (voir chap. 6.3.1) ont affecté la pêche sportive et récréative, de même que les rendements de la pêche professionnelle. Dans certains cas particuliers, le tourisme peut également être un facteur limitant pour la gestion des réserves d'eau. En Bavière par exemple, le transfert d'eau depuis l'Altmühl (voir figure 4) ne fonctionne que tant qu'il reste suffisamment d'eau dans les lacs d'Altmühl, de Brombach et de Roth pour les activités touristiques.

Les restrictions indiquées dans le paragraphe sur la navigation s'appliquent également aux bateaux privés et aux bateaux de passagers. En revanche, si la période d'étiage est accompagnée d'un temps chaud, le tourisme (local) peut augmenter. En 2003, le trafic touristique était restreint sur le haut Rhin/le lac inférieur, mais le nombre de passagers a augmenté globalement à cause du beau temps. En Allemagne, les bateaux de passagers effectuant de longs trajets n'ont pas toujours pu circuler. En revanche, la navigation à courte distance a enregistré une hausse du nombre de passagers. Les rivières et barrages de vallée asséchés peuvent également attirer les touristes (« tourisme d'étiage », LAWA, 2007). Cependant, la qualité des eaux de baignade, et tout particulièrement celle des petites rivières, peut être altérée par des concentrations élevées de polluants et la formation de cyanobactéries, ce qui peut constituer localement un risque pour la santé publique (baignade et autres loisirs aquatiques).

## Sécurité (notamment des infrastructures et des installations (de protection contre les inondations))

Aux Pays-Bas notamment, l'instabilité des digues (de tourbe) (dispositifs de protection contre les crues) pose problème lorsque les niveaux d'eau sont bas. Il existe des digues de tourbe sur un total de 3 500 km aux Pays-Bas, notamment dans les zones suivantes : Utrechts Hollandse Veenweidegebied, Hollande septentrionale, Frise et Groningue. En août 2003 par ex., les digues de tourbe se sont affaissées à deux endroits et de l'eau est entrée à l'intérieur des polders plus en contrebas (avec pour conséquence jusqu'à 40 cm d'eau dans les habitations à hauteur de Wilnis).

En 2011 également, il a fallu maintenir le niveau d'eau dans les polders pour éviter un affaissement de terrain et une hausse de la salinité aux Pays-Bas.

En Allemagne, quelques bombes de la Seconde Guerre Mondiale mises à jour par la baisse des eaux dans le Rhin en 2011 ont dû être désamorçées.

## 6.4 Gestion nationale des étiages

Les indications dans ce chapitre se basent sur une enquête effectuée auprès des Etats du bassin du Rhin et sur des rapports relatifs à des événements passés (CIPR (document interne), 2017). Différentes mesures et modules d'actions existent dans les Etats. Une politique de gestion durable des étiages doit comporter à la fois des mesures préventives et des mesures opérationnelles (voir fig. 6) (BY-LfU, 2016 ; Wahliß, 2017). Les plans d'action et les mesures de prévention des étiages doivent minimiser à long terme les processus de formation et les impacts des étiages en amont de ces phénomènes. La gestion opérationnelle des étiages a quant à elle pour fonction de mettre en place des mesures à action rapide dans les situations aiguës d'étiage. L'attention doit porter essentiellement sur 4 domaines : analyse d'épisodes passés et futurs, évaluation de leurs impacts sur les utilisations de l'eau, prévention/protection contre les événements futurs, mesures de gestion d'un épisode d'étiage concret.

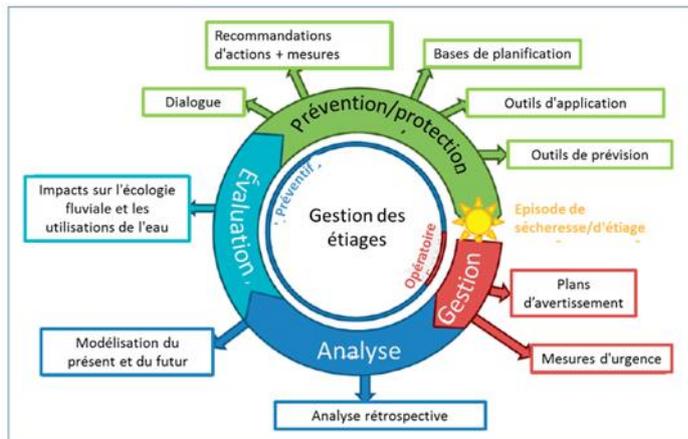


Figure 6 : Cycle de la gestion des étiages et des champs d'actions correspondants (BY-LfU, 2016 ; Wahliß, 2017)

### 6.4.1 Surveillance, prévision, information et avertissement

La gestion des étiages doit pouvoir reposer sur une base d'informations détaillées. Cette base d'informations se fonde sur des données de monitoring et englobe également celles des services d'annonce et d'avertissement, permettant d'évaluer la situation actuelle, et des prévisions d'évolution.

**Surveillance, modèles et prévision :** la surveillance régionale et nationale des étiages se fait fondamentalement via un réseau d'échelles au droit desquelles est mesurée la hauteur d'eau qui est ensuite convertie en une valeur de débit. Les deux paramètres hydrologiques, à savoir le niveau d'eau et le débit, sont recensés avec une résolution temporelle de 5 minutes (en Suisse), 10 minutes (aux Pays-Bas) ou encore allant jusqu'à 15 minutes (en Allemagne, au Luxembourg). Selon les stations d'analyse, les paramètres non hydrologiques mesurés sont entre autres la température et la qualité de l'eau avec différentes résolutions temporelles.

Une grande partie des Etats publie au moins une fois par jour une prévision des niveaux d'eau pour les principales échelles de crues même en dehors des périodes de crue. Les étiages sont donc compris automatiquement dans ces prévisions (voir détails dans la case plus bas). Les modèles de bilan hydrologique permettent d'élaborer pour les rivières des prévisions des débits et, parfois en Allemagne, des prévisions de la température d'eau.

Il existe différents modèles en Suisse. En Allemagne, les acteurs impliqués utilisent LARSIM en RLP, BW et HE et la BfG utilise le modèle WAVOS. Sur le Main, la Bavière n'utilise pas LARSIM mais SOBEK. Quelques centres en France utilisent des modèles de crues à cet effet, le Luxembourg et les Pays-Bas recourent quant à eux à des modèles de prévisions météorologiques et des modèles de bilan hydrologique. Aux Pays-Bas, des prévisions sont effectuées et publiées tous les jours. En cas d'épisodes d'étiage importants, un rapport hebdomadaire est publié.

Pour les niveaux bas d'eau souterraine, il existe uniquement des méthodes conceptuelles, mais pas de modélisation opérationnelle. Dans le cadre de la surveillance en Bavière (NID : service d'information des étiages), il est fait la distinction entre stations d'analyse en surface et celles situées en profondeur. Les stations d'analyse en surface font également ressortir des fluctuations à court terme et donnent des indications sur les ressources en eau alimentant les ruisseaux et les rivières en période de sécheresse. Les stations d'analyse situées en profondeur montrent plutôt les fluctuations à long terme.

Au niveau de l'UE, on citera l'European Drought Observatory (EDO, *Observatoire européen de la sécheresse*) (Cammalleri/JRC, 2017). Les pages de l'EDO contiennent des informations importantes sur la sécheresse, comme par ex. des cartes d'indicateurs tirées de différentes sources de données (par ex. mesures de précipitations, mesures satellitaires, modélisation de l'humidité du sol). Différents outils permettent d'analyser les informations et les « Drought News » donnent une vue d'ensemble de la situation en périodes de menace de sécheresse.

Bien que les prévisions ou projections à long terme soient précieuses pour différentes utilisations (par ex. la navigation), elles représentent encore un défi de taille. Des projets de ce type sont encore en phase expérimentale dans le bassin du Rhin et leur portée est limitée sous l'angle technique. Pour gérer les étiages, il faut disposer de périodes de préannonce plus longues que pour les crues. Des équipes de scientifiques et d'utilisateurs ont discuté de ce sujet dans le cadre de l'atelier commun organisé par la CHR (CHR, 2017). On y a présenté des contributions intéressantes comme une approche statistique pour les prévisions mensuelles et saisonnières de (faibles) niveaux d'eau du Rhin sur la base de données hydrologiques, atmosphériques et océaniques (utilisée par la BfG pour mettre au point des produits mensuels à saisonniers pour les voies d'eau navigables allemandes) (Ionita-Scholz, 2017). Il y a également été montré l'« Hydrological Ensemble Prediction System » (HEPS) en service depuis 2013 pour les prévisions d'ensemble sur les étiages délivrées à rythme mensuel. La topographie de la Suisse et la petite superficie des bassins rendent difficiles les prévisions à long terme et il est signalé à ce propos (Zappa et al., 2017) que les « prévisions allant au-delà de 32 jours ont plus le caractère d'un jeu de hasard ».

### **Messages d'avertissement et rapports sur les étiages (également aux fins de sensibilisation et de prévention) :**

Cette tâche entre dans le champ de compétence spécifique des Länder en Allemagne. On peut citer ici à titre d'exemples le « Service d'information sur les étiages » en Bavière - à la disposition des entreprises de gestion des eaux pour qu'elles puissent réagir précocement et du public pour information - ou le Plan écologique d'alerte Main (AMÖ), pour avertir de la menace d'un étiage à court terme et pour tenter d'en empêcher les conséquences négatives sur l'écologie fluviale (BY-LFU, 2016 ; Gouvernement de Basse-Franconie, 2012 ; Wahliß 2017).

En ce qui concerne les événements (prononcés) passés, il y a en général des rapports spéciaux dans les annuaires hydrologiques (BfG, Länder fédéraux).

Au Luxembourg, les messages d'avertissement sont exclusivement publiés via des communiqués de presse et des rapports d'événements nationaux. Il n'existe pas là de niveaux d'avertissement, mais des recommandations d'actions sur la base d'avis d'experts.

En France, des seuils d'alerte et d'avertissements sont définis pour la région Grand Est (bassin Rhin-Meuse) afin de pouvoir qualifier la situation hydrologique. Lorsque cela est nécessaire, des arrêtés préfectoraux de limitation ou de suspension des usages de l'eau sont adoptés. Les services de l'Etat publient régulièrement un bulletin qui fait un état des lieux de l'atteinte de différents seuils. Par ailleurs, à l'échelle de l'ensemble du territoire français métropolitain, il existe un site internet destiné au public qui regroupe l'ensemble des mesures de limitation et de suspension en vigueur (Propluvia).

En Suisse, l'avertissement est en cours de développement au niveau national mais des éventuelles situations d'étiage sont évoquées dans les bulletins hydrologiques publiés deux fois par semaine. En outre, les services cantonaux publient des informations sur les étiages sur le site [www.drought.ch](http://www.drought.ch).

Aux Pays-Bas, c'est la Landelijke Coördinatiecommissie Watervdeling (*Commission nationale de coordination de la répartition de l'eau*, LCW) qui fait rapport et émet les avertissements, et des rapports nationaux et régionaux sur la sécheresse sont publiés. Par ailleurs, des déclarations journalières de niveau d'eau sont adressées à la navigation.

**Prévisions et rapports d'étiage dans les différents Etats (source : inventaire et informations des centres de prévision des crues du Rhin ; modifié selon CIPR, 2016 (document interne)) :**

- En Suisse, les prévisions de débits sont communiquées sur le site internet de l'OFEV (voir [ici](#)) et les prévisions de sécheresse sur un site spécifique [www.drought.ch](http://www.drought.ch) (plateforme d'information pour la détection précoce des épisodes de sécheresse en Suisse).
- La France utilise occasionnellement des modèles de prévision des étiages. Pendant la période de l'année la plus critique en matière d'étiages (généralement de mai à septembre inclus), la DREAL Grand Est surveille à rythme hebdomadaire la situation hydrologique des rivières. Quand est dépassé un seuil minimal de débits, la DREAL Grand Est envoie des bulletins de situation aux différents acteurs. Par ailleurs, EDF exploite son propre système de prévision des étiages pour assurer la sécurité de ses installations, respecter les standards environnementaux, améliorer la gestion de la ressource en eau et optimiser la production des usines et centrales (Puygrenier et Antheaume, 2017).
- Allemagne :
  - BfG / Wasserschiffahrtsverwaltung (WSV) : prévision journalière des niveaux d'eau en situation d'étiage pour le Rhin en aval de Worms. La prévision repose sur le système de prévision des niveaux d'eau WAVOS (WAVOS sert à la fois aux prévisions d'étiage, de débits moyens et de crue et est opérationnel dans plusieurs bassins). Vers la fin de l'automne, quand la fréquence des niveaux d'étiage augmente, une personne est d'astreinte en permanence. Des prévisions sont établies entre autres pour la navigation (Allemagne, Pays-Bas) : ELWIS.
  - BW : prévisions journalières actualisées des étiages pour le Rhin de Constance à Mannheim et pour ses principaux affluents (LARSIM). Il est effectué de plus une variante de prévision No Rain pour mettre en évidence l'évolution attendue en cas d'absence de précipitations dans les 7 jours à venir.
  - HE, RLP : prévision des étiages pour les affluents au moyen de LARSIM.
  - BY : des prévisions sont produites chaque jour (également pour le Main) et publiés sur le site internet du service d'annonce des crues (HDN) de l'Office bavarois de l'environnement.
  - Rhénanie du Nord-Westphalie : pas de véritable prévision mais attention accrue portée aux précipitations hivernales (important pour la recharge de la nappe souterraine).
- Aux Pays-Bas, les informations et les prévisions se fondent sur des modèles forcés par des prévisions météorologiques. Actuellement, les Pays-Bas mettent également au point l'outil WABES. Il permet entre autres de produire des prévisions d'étiage dans le long terme sur la base de pronostics météorologiques et de prévisions sur les évolutions climatiques, ceci pour informer les utilisateurs de la disponibilité de la ressource en eau sur les sites significatifs les concernant dans les principaux axes du réseau hydrographique. Les modèles RwsOS sont utilisés pour le monitoring opérationnel et les rapports sur les étiages (entre autres pour la navigation).
- Au Luxembourg, il n'est pas généré de prévisions d'étiage à proprement parler. A l'avenir, il est prévu d'utiliser le modèle de prévision LARSIM également en cas d'étiage pour pouvoir estimer le débit minimal potentiel pendant la période de prévision en cas d'absence de précipitations. Un service d'annonce spécifique et de publication de bulletins de situation pourra alors entrer en action. Il faut cependant que le modèle soit auparavant modifié et qu'une procédure spécifique soit mise au point.

#### 6.4.2 Gestion opérationnelle et mesures

Il existe dans les Etats différents **cadres juridiques** :

- au niveau national avec la Loi sur le régime des eaux en Allemagne, le Code de l'environnement et des circulaires nationales sur les étiages en France, la Loi sur l'eau, le programme Delta et les décisions Delta aux Pays-Bas ;

- au niveau régional avec des dispositions spécifiques aux Länder en Allemagne et aux cantons en Suisse, les arrêtés-cadre (inter)départementaux en France et les plans de gestion de la ressource hydrique des syndicats des eaux aux Pays-Bas.

Les Etats membres de l'UE dans le bassin du Rhin sont tenus de mettre en œuvre la DCE au niveau national. Les Etats établissent ainsi des Plans de gestion (PdG) qui couvrent également la problématique des étiages.

En ce qui concerne la **planification et les décisions sur les mesures de gestion des étiages**, les organes compétents sont les cantons en Suisse (entre autres pour la mise au point de plans d'approvisionnement en eau), les Länder en Allemagne (PdG, plans de développement régionaux), le niveau national au Luxembourg (PdG, plan d'urgence pour les producteurs d'eau potable), les départements en France (« Arrêtés-cadre » qui définissent des périodes d'action pour chaque échelle en fonction de l'atteinte de certains seuils : vigilance, alerte, alerte renforcée, crise) ainsi que l'Etat, les provinces et les syndicats des eaux) aux Pays-Bas (niveau national et régional : plan national de l'eau, PdG, plan de développement et plans de gestion des eaux des syndicats des eaux).

La **planification et l'organisation de la gestion des crises** (concertation/prise de décisions avant une période de sécheresse ou un épisode d'étiage) relèvent principalement du niveau régional dans les Etats du bassin du Rhin (cantons, Länder allemands, départements/régions, syndicats des eaux), mais aussi du niveau national au Luxembourg, aux Pays-Bas ou en France (en cas de très grand événement) avec la mise en place de cellules de coordination centralisées. Différents acteurs sont responsables, par ex. le Comité sécheresse, le service régional de conseil en cas de sécheresse. Les organes décisionnels ou consultatifs disposent d'informations et de processus afin de **prioriser** les fonctions et les usages qui doivent être limités ou garantis pendant une période de sécheresse ou un épisode d'étiage (ces données figurent également dans les plans de ces organes). Exemples :

- les « arrêtés cadre » français définissent 4 niveaux : la « période de vigilance » (mesures de sensibilisation), la « période d'alerte » (mesures de limitations), la « période d'alerte renforcée » (limitations plus rigoureuses) et la « période de crise » (mesures d'arrêt des prélèvements non prioritaires). En résumé, les priorités sont, comme au Luxembourg, les suivantes : l'alimentation en eau potable, suivie des usages économiques puis des loisirs.
- Aux Pays-Bas, c'est à la LCW de recommander les mesures de répartition des ressources en eau disponibles. Elle se base pour ce faire sur une liste nationale qui définit et ordonne la priorité accordée à chaque utilisateur d'eau en cas de sécheresse (catégorie sécurité, par ex. digues, dommages irréversibles à la nature : plus haute priorité) (voir figure 7). Il existe en outre aux Pays-Bas 4 stades de préparation et de gestion de crise (situation normale, menace de pénurie d'eau, pénurie d'eau et menace de crise à cause d'une pénurie d'eau).

Catégorie 1 Sécurité et prévention de dommages irréversibles	Catégorie 2 Entreprises d'approvisionnement en eau et énergie	Catégorie 3 Usage important à petite échelle	Catégorie 4 Autres intérêts (aspects écologiques, également pour le milieu)
1. Stabilité des dispositifs de protection contre les inondations 2. Compactage et tassement (zones marécageuses et tourbières hautes) 3. Milieu ( <u>en relation avec la nature des sols</u> )	1. Approvisionnement en eau potable 2. Approvisionnement en énergie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irrigation provisoire de plantes onéreuses</li> <li>• Eau de process</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navigation</li> <li>• Agriculture</li> <li>• Milieu (tant qu'il n'y a pas de dommage irréversible)</li> <li>• Industrie</li> <li>• Loisirs</li> <li>• Pêche fluviale</li> </ul>
Prioritaire par rapport à	Prioritaire par rapport à	Prioritaire par rapport à	

Figure 7 : liste nationale d'ordre de priorité aux Pays-Bas (MVW, 2009a, 2009b)

## **Mesures de gestion opérationnelles (y compris répartition de l'eau)** (voir également en partie le chapitre 6 et la figure 3)

Outre l'information et la sensibilisation du public et des utilisateurs (également pour une action préventive/responsable et une gestion économe de la ressource en eau), tous les Etats disposent d'une série de mesures : utilisation/commutation de petites unités d'alimentation en eau, répartition d'eau (potable), mesures spécifiques de soutien des débits et de recharge de la nappe souterraine ainsi que différentes restrictions des usages. Les fonctions critiques sont décrites en détail dans le chapitre 6.3.2. On retient globalement que les répercussions des étiages ne peuvent pas toutes être compensées ou annulées par des mesures de gestion (opérationnelles).

**Explication en marge : la gestion des étiages et les pénuries d'eau locales en Suisse (Zahner, 2017)** : la méthode suisse de gestion des étiages se compose de 3 modules dont 2 à caractère préventif et 1 pour la gestion (de crise) à court terme. Le premier module consiste à identifier des régions à risque. Les produits finaux issus de ce module sont des cartes de référence sur les pénuries d'eau. Le module 2 traite de la gestion des ressources en eau sur le long terme (planification stratégique). Le module 3 est une boîte à outils conçue pour la maîtrise des risques résiduels. Il contient des mesures de pondération des intérêts en cas de conflits d'usages et des mesures de prévention des dommages pour les usagers et pour l'écologie.

## **7. Analyse des chroniques des échelles du Rhin**

### **7.1 Comportement des paramètres d'étiage dans le long terme**

Ont été analysés dans un premier temps les épisodes d'étiage les plus prononcés du dernier centenaire (1914-2015). Contrairement aux crues qui s'étendent rarement à l'ensemble du bassin du Rhin et à tous les tronçons du Rhin, les épisodes d'étiage touchent le bassin du Rhin dans son ensemble. Les étiages sont liés à des situations météorologiques prolongées et à grande extension géographique qui couvrent généralement tout le bassin du Rhin. 21 épisodes d'étiage ont été observés sur 17 années durant la période susmentionnée (1914-2015). Aux fins de classification statistique de la période de retour du débit d'étiage et de la durée, on a tenu compte de la période de référence 1961-2010 car elle correspond aux conditions actuelles. Cette approche fait que les périodes de retour des épisodes survenus durant la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle paraissent « surélevées », mais elles correspondent cependant à celles que l'on aurait si ces épisodes se produisaient aujourd'hui. Il est donc possible de comparer ces épisodes et les épisodes actuels de manière relative. Le tableau 2 fait état des fourchettes de périodes de retour observées entre Bâle et Lobith. Les conditions aux échelles de Diepoldsau et Rekingen correspondent au régime nival, là où des phases d'étiage se produisent à des périodes de l'année souvent différentes de celles des autres échelles. Les périodes de retour rapportées aux échelles figurent en détail dans les descriptions des années caractérisées par des étiages.

Il en ressort fondamentalement que les épisodes d'étiage extrêmes historiques se sont produits dans les années vingt et quarante du siècle passé. Les épisodes d'étiage surviennent le plus souvent au cours de l'automne et de l'hiver. Les épisodes d'été (1976, 2003 et 2006) plus rares, mais dont les débits sont moins extrêmes, peuvent poser problème s'ils sont accompagnés de températures très élevées de l'eau. Durant la période de référence, des épisodes d'étiage prononcés sont observés en 1962/63 et 1971/72, leur intensité baissant ensuite sensiblement, à l'exception de l'épisode 2003. On soulignera également les années 1921 et 1976 respectivement caractérisées par trois épisodes d'étiage, ceux de 1976 étant toutefois nettement plus faibles. Les étés 2003 et 2006 sont liés à des températures très élevées de l'eau, mais les débits de l'été 2006 ne correspondent pas à ceux d'un étiage particulièrement prononcé.

Tableau 2 : relevé des épisodes d'étiage entre 1920 et 2015 dans le Rhin avec indication des périodes de retour (probabilités d'occurrence statistiques) du plus petit débit « NM7Q » et de la durée maximale « MaxD » sous le MNM7Q (échelle de Rekingen jusqu'à Lobith).

Episode d'étiage		Débit - période de retour [a] NM7Q	Durée- période de retour [a] maxD	Remarque
<b>Nov./déc.</b>	1920	15-100	15-50	
<b>Mars-mai</b>	1921	15-100	50-100	
<b>Sept.-nov.</b>	1921	5-100	5-100	
<b>Nov./déc.</b>	1921	20-100	10-15	
<b>Oct./nov.</b>	1943	10-20	5-20	
<b>Août-nov.</b>	1947	40-100	20-100	
<b>Juil.-nov.</b>	1949	10-100	20-100	
<b>Sept. 53-janv. 54</b>	1954	15-100	20-50	
<b>Sept.-déc.</b>	1959	15-55	10-100	
<b>Oct./déc.</b>	1962	15-70	40-75	
<b>Janv.-mars</b>	1963	20-65	15-50	
<b>Oct./nov.</b>	1971	20-35	10-35	
<b>Oct./nov.</b>	1972	10-35	5-20	
<b>Juil.</b>	1976	2-15	2-5	
<b>Août/sept.</b>	1976	2-5	2-10	
<b>Oct./nov.</b>	1976	2-5	2-10	
<b>Oct./nov.</b>	1985	5-15	5-10	
<b>Août/sept.</b>	2003	5-35	5-30	<b>Température élevée de l'eau</b>
<b>Juil.</b>	2006	<2	<2	<b>Température élevée de l'eau</b>
<b>Nov.-déc.</b>	2011	5-10	5-10	
<b>Oct./nov.</b>	2015	2-10	2-20	
	<b>Dans la période de référence de la classification statistique</b>			
	<b>Episodes extrêmes</b>			
	<b>Années comprenant plusieurs épisodes d'étiage</b>			

Dans le relevé des paramètres de débit des échelles analysées (pour la période de référence 1961-2010), les tableaux 3 et 4 font ressortir l'importance du débit et du débit d'étiage à l'échelle de Bâle pour toutes les échelles en aval. Entre l'échelle de Rekingen et celle de Bâle, les débits augmentent de plus du double du fait de l'apport de l'Aar. Autant le débit moyen de 1 065 m<sup>3</sup>/s que le débit d'étiage moyen de 508 m<sup>3</sup>/s à l'échelle de Bâle représentent encore environ les trois quarts des débits à l'échelle de Worms, environ 60 % des débits à l'échelle de Kaub et encore presque 50 % des débits sur le Rhin inférieur.

Tableau 3 : paramètres de débit moyen et de débit d'étiage aux échelles du Rhin

Paramètres de débit à hauteur de différentes échelles du Rhin				
	Période 1961-2010 (année hydrologique)			
[m <sup>3</sup> /s]	MQ	MNQ	MNM7Q	NQ
Diepoldsau	233	72	92	41
Rekingen	445	232	238	134
<b>Bâle</b>	<b>1065</b>	<b>508</b>	<b>527</b>	<b>319</b>
Maxau	1255	618	645	373
Worms	1431	694	720	400
Mayence	1671	824	850	501
Kaub	1713	824	851	525
Andernach	2115	967	998	622
Cologne	2175	999	1028	644
Lobith	2287	1066	1095	665

Tableau 4 : Pourcentages de débit de l'échelle de Bâle

Pourcentages de débit de l'échelle de Bâle				
	Période 1961-2010 (année hydrologique)			
[% de Bâle]	MQ	MNQ	MNM7Q	NQ <sup>3</sup>
<b>Bâle</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
Maxau	85	82	82	86
Worms	74	73	73	80
Mayence	64	62	62	64
Kaub	62	62	62	61
Andernach	50	53	53	51
Cologne	49	51	51	50
Lobith	47	48	48	48

Du fait du régime nival en zone alpine, les débits d'étiage affichent un minimum en hiver (les précipitations sont liées sous forme de neige) et un maximum après la fonte des neiges en été. Dans le secteur aval caractérisé par un régime pluvial (dans les bassins des affluents, les principales périodes d'étiage sont en été), les débits dans le Rhin sont soutenus jusqu'à l'été par le débit important provenant de régions au régime nival.

<sup>3</sup> NQ est la valeur la plus basse sur la période allant de 1961 à 2010. Pour les différentes échelles, le rapport (pourcentage) calculé relativement à NQ à l'échelle de Bâle peut provenir de différentes années qui ne sont pas obligatoirement identiques à celle prise pour la valeur NQ à l'échelle de Bâle. Dans le cas d'un épisode d'étiage concret, les valeurs de rapports (pourcentages) peuvent être différentes et la contribution relative du débit provenant de l'échelle de Bâle peut être, en particulier lors d'étiages estivaux, nettement plus élevée.

Pour analyser et visualiser l'évolution des étiages et les antécédents hydrologiques, un graphique représentant les hydrogrammes des échelles analysées a été élaboré pour tous les épisodes d'étiage historiques. La figure 8 présente les hydrogrammes de l'épisode d'étiage d'août et de septembre 2003. Pour tous les épisodes, les graphiques correspondants et les paramètres et classements en période de retour sont représentés dans des fiches de données sur les événements extrêmes (voir chap. 7.5 et annexe 2).

La courbe inférieure (bleue) de la figure 8 montre pour l'échelle de Diepoldsau une évolution s'écartant sensiblement des autres hydrogrammes. L'échelle de Diepoldsau présente d'une part un régime hydrologique nival caractérisé par des réserves de neige et par la fonte des neiges ; elle reproduit d'autre part des impacts anthropiques marquants provenant des décalages dans le temps dus à la gestion des espaces de rétention et des usines hydroélectriques. L'hydrogramme suivant, celui de Rekingen, a une évolution équilibrée qui s'explique en premier lieu par l'écoulement saisonnier du lac de Constance. En revanche, les autres hydrogrammes à partir de l'échelle de Bâle sont semblables et reproduisent clairement l'influence des épisodes pluviaux. Cette évolution très similaire, notamment en période d'étiage en août et septembre, s'explique par le débit élevé provenant des zones alpines et préalpines à l'échelle de Bâle, que l'on retrouve pour une part très importante dans les échelles plus en aval et qui contribue encore à raison d'environ 50 % au débit total à l'échelle de Lobith. L'épisode d'étiage s'est poursuivi avec de brèves interruptions dues à des précipitations à partir de juillet 2003 et a entraîné des débits très faibles fin septembre 2003, remplacés par des débits importants début octobre 2003.

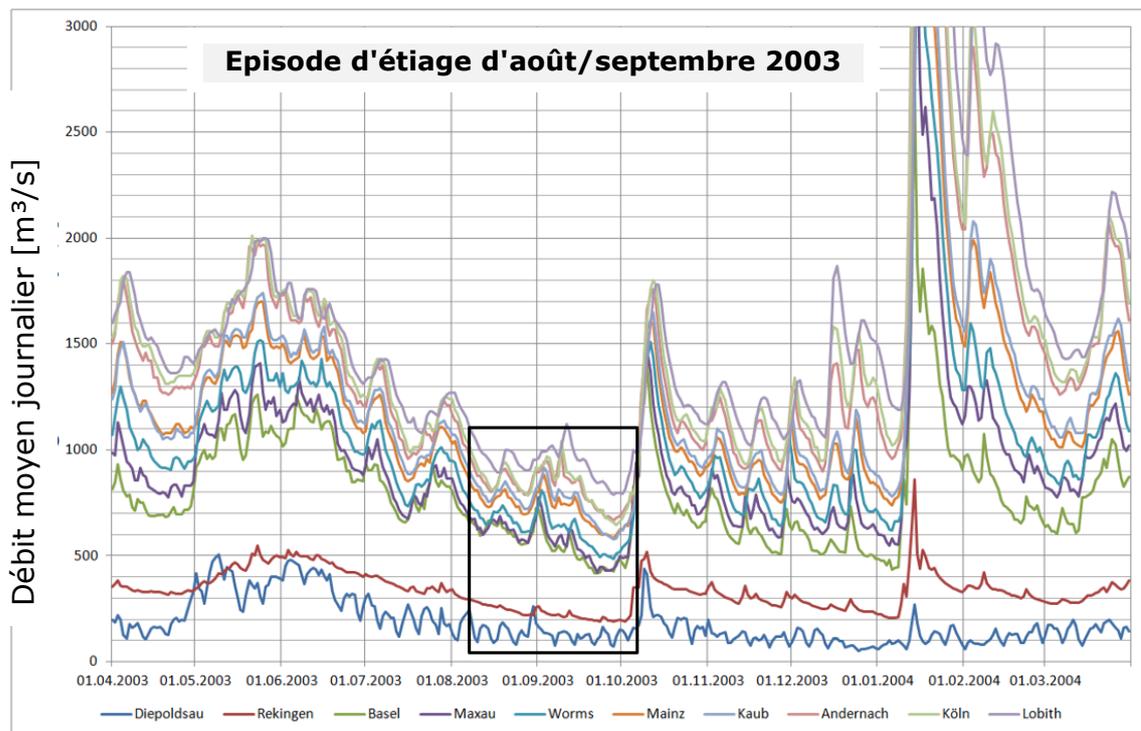


Figure 8 : hydrogrammes de l'épisode d'étiage d'août/septembre au cours de l'année hydrologique 2003

## 7.2 Période de référence et paramètres d'étiage

On a effectué une analyse de rupture sur l'évolution dans le temps des valeurs annuelles NM7Q aux principales échelles du Rhin, ceci pour vérifier si les chroniques étaient homogènes et comment les valeurs changeaient. L'analyse de rupture est une méthode statistique permettant de détecter des modifications soudaines dans une chronique. En général, les périodes partielles sont comparées généralement quant à leur évolution. S'il est déterminé un point de rupture significatif, la chronique analysée n'est pas homogène, c'est-à-dire que l'évolution des chroniques partielles est différente avant et après le point de rupture.

Les graphiques ci-dessous présentent à titre d'exemple les valeurs NM7Q des périodes d'observation disponibles avec les phases de rupture pour les échelles de Diepoldsau, Maxau, Kaub et Cologne (cf. figures 9 à 12).

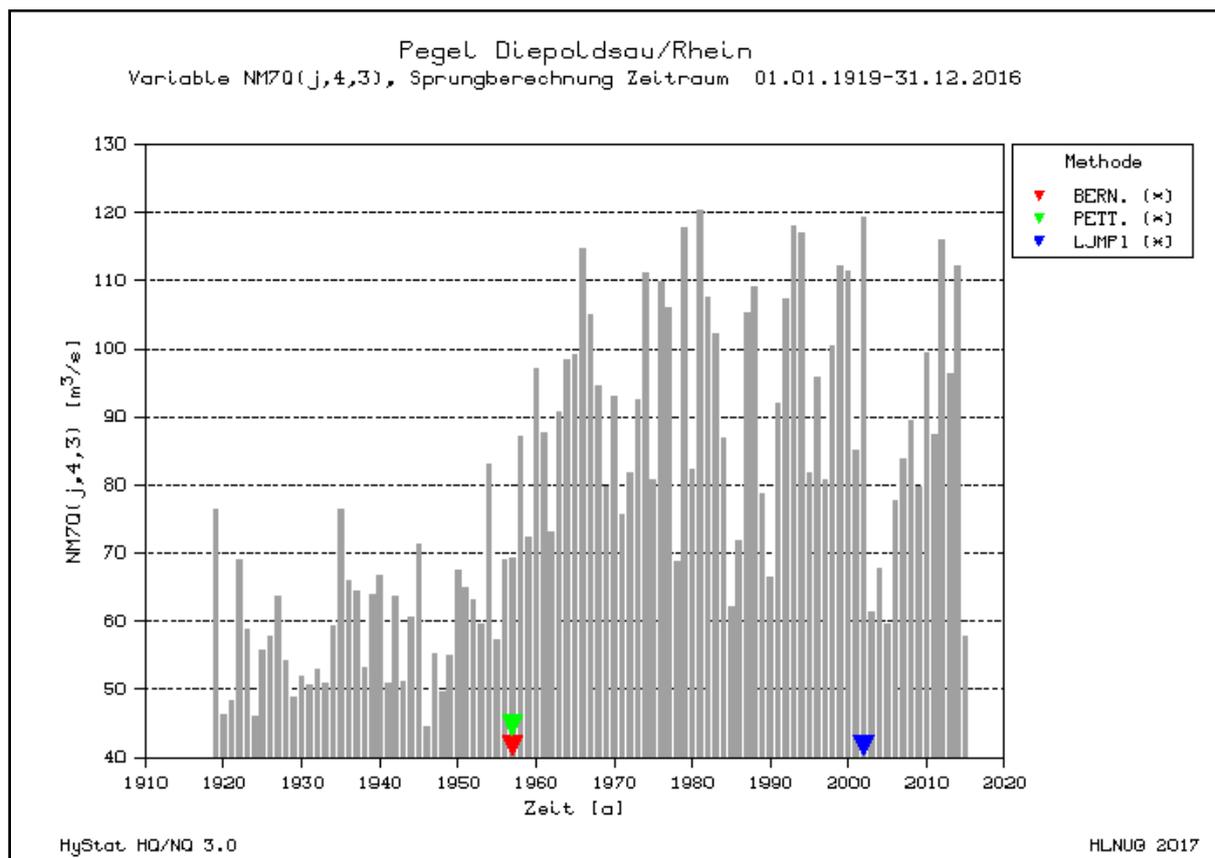


Figure 9 : valeurs annuelles NM7Q à l'échelle de Diepoldsau et points de rupture identifiés

### Légende

Pegel	Echelle
Sprungberechnung Zeitraum	Période de calcul des points de rupture
Zeit	Axe temps
(j,4,3)	Année hydrologique d'avril à mars

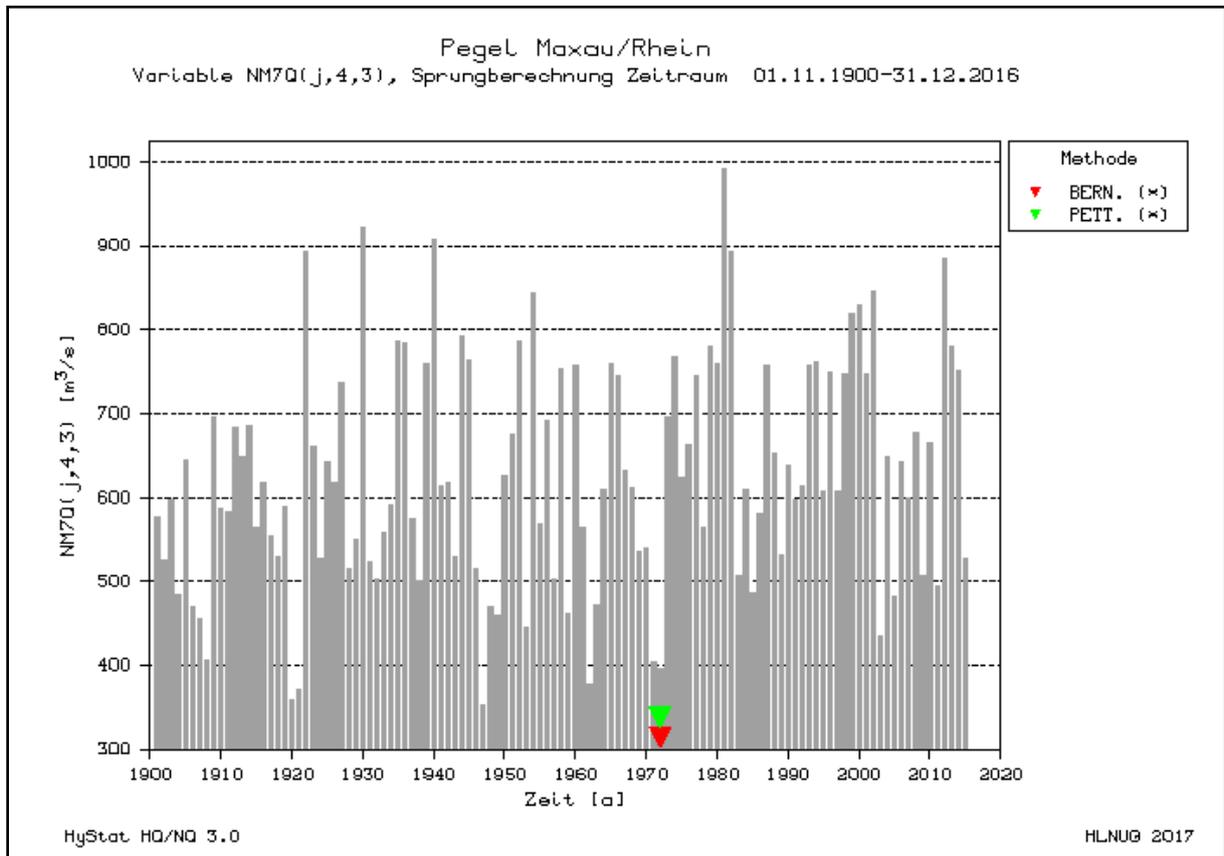


Figure 10 : valeurs annuelles NM7Q à l'échelle de Maxau et points de rupture identifiés

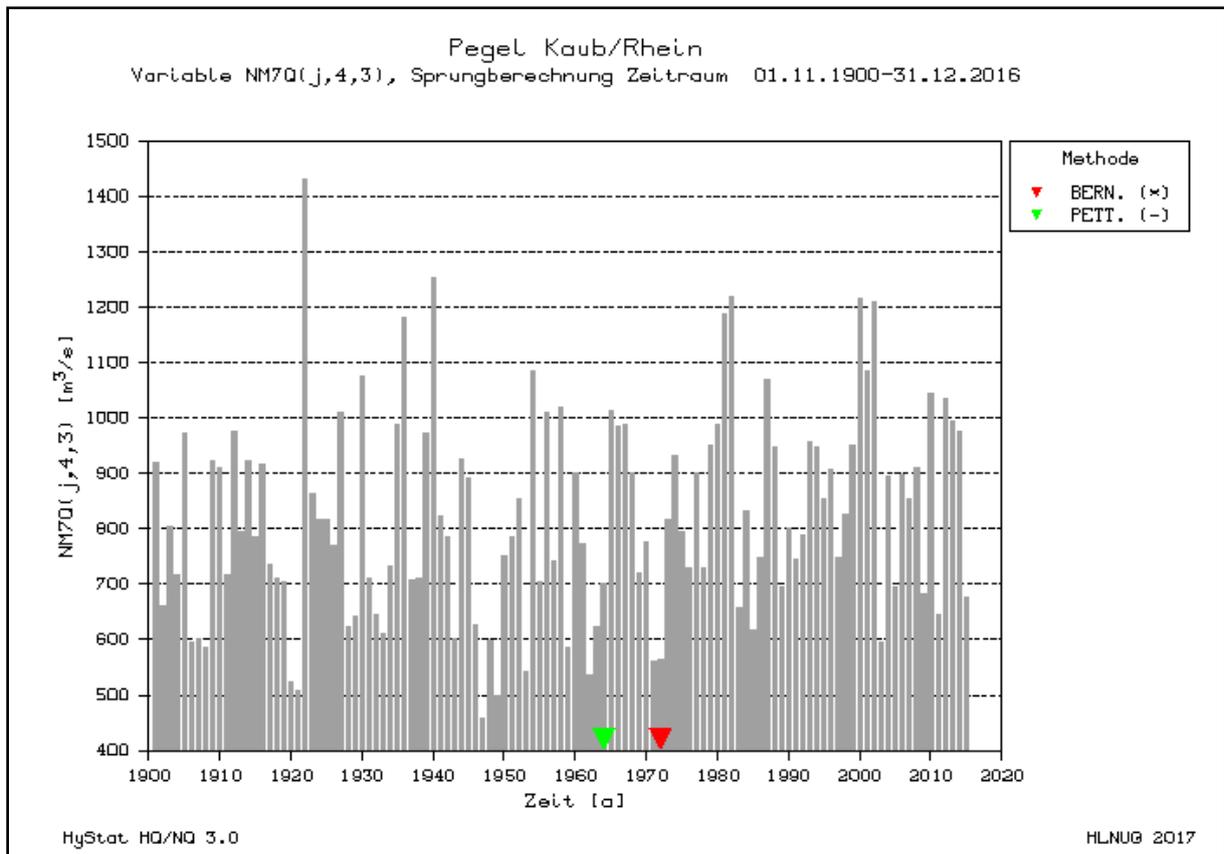


Figure 11 : valeurs annuelles NM7Q à l'échelle de Kaub et points de rupture identifiés

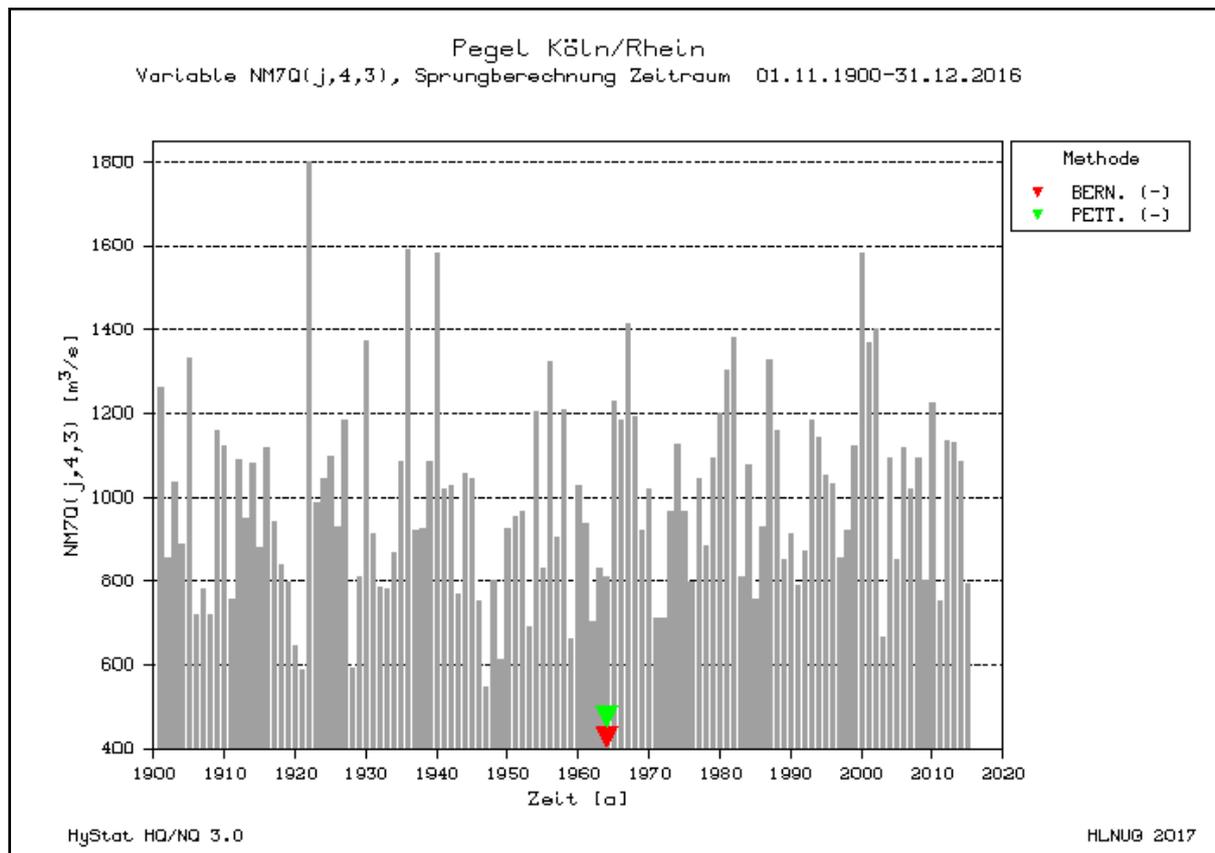


Figure 12 : valeurs annuelles NM7Q à l'échelle de Cologne et points de rupture identifiés

Pour l'échelle de Diepoldsau où les débits d'étiage ont fortement augmenté après l'aménagement d'ouvrages de stockage dans le bassin à partir des années 1960 environ, par rapport à la période précédente, le graphique montre que les valeurs sont très hétérogènes. A l'échelle de Maxau, le point de rupture survient un peu plus tard (en 1970 env.), pour l'échelle de Kaub, les deux méthodes de détermination des points de rupture font apparaître des secteurs légèrement divergents (entre 1960 et 1970). Enfin, à l'échelle de Cologne, le point de rupture survient à nouveau dans les années 1960 (cf. tableau 5). Pour toutes les échelles, les valeurs annuelles NM7Q les plus faibles sont apparues avant 1960 ; ces valeurs extrêmes n'ont plus été atteintes depuis cette date. Les chroniques NM7Q depuis 1960 ne permettent pas d'identifier de tendances à la baisse des débits d'étiage.

Tableau 5 : dates (années) de points de rupture selon des analyses de rupture

Echelles	Point de rupture selon BERNIER	Point de rupture selon PETTIT
Diepoldsau	1957	1957
Rekingen	1964	1964
Bâle	1972	1972
Maxau	1971	1971
Worms	1971	1971
Mayence	1971	1971
Kaub	1971	1963
Andernach	1963	1963
Cologne	1963	1963
Lobith	1978	1978

Conformément aux points de rupture significatifs constatés entre 1957 et 1972 (à l'exception de Lobith), on a pris comme période de référence d'un état quasi-stationnaire et représentatif des conditions actuelles la **chronique du 1.4.1961 au 31.3.2011** comme **chronique de référence de 50 ans** pour les autres classifications statistiques. Cela signifie que le MNM7Q calculé pour la période couvrant les années hydrologiques de

1961 à 2010 est utilisé dans les étapes suivantes de l'analyse comme valeur seuil pour contrôler les NM7Q annuels, à déterminer à partir des chroniques, et définir sur cette base les périodes de retour.

## 7.3 Débits d'étiage

### 7.3.1 Analyse de tendances des paramètres d'étiage

L'analyse de tendances permet d'examiner et éventuellement d'identifier des tendances à long terme de séries rapportées au débit. On a évalué en particulier la détermination d'une droite de tendance selon la méthode de minimisation de l'erreur standard de prédiction. La décision sur la présence d'une tendance statistiquement significative a été prise sur la base du test Mann-Kendall non paramétrique (qui ne suppose pas d'évolution linéaire de la tendance) et du test t du coefficient de pente des droites (qui suppose toutefois une répartition normale des résidus du modèle de régression estimé).

Les débits d'étiage NM7Q affichent pour toute la période d'observation (non homogène) une tendance arithmétiquement significative à la hausse ( $p < 0,05$ ) (cf. tableau 6) pour les échelles du Rhin situées entre Diepoldsau et Andernach. La chronique de l'échelle de Bâle est présentée à titre d'exemple dans le graphique ci-dessous (cf. figure 13).

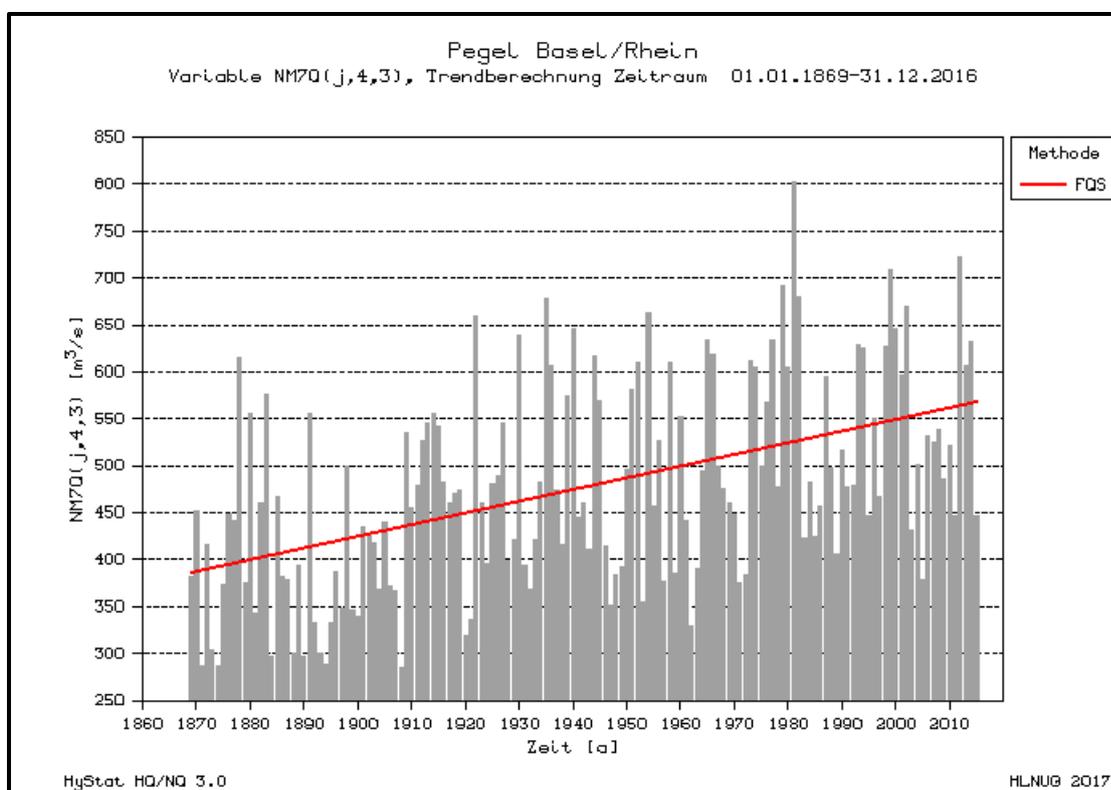


Figure 13 : analyse de tendances de la série NM7Q à l'échelle de Bâle

#### Légende

Pegel	Echelle
Trendberechnung Zeitraum	Période de calcul de tendance
Zeit	Axe temps
(j,4,3)	Année hydrologique d'avril à mars

Pour l'échelle de Cologne (cf. fig. 14) et celle de Lobith en revanche, il n'est pas possible de détecter de tendance significative (cf. tableau 6).

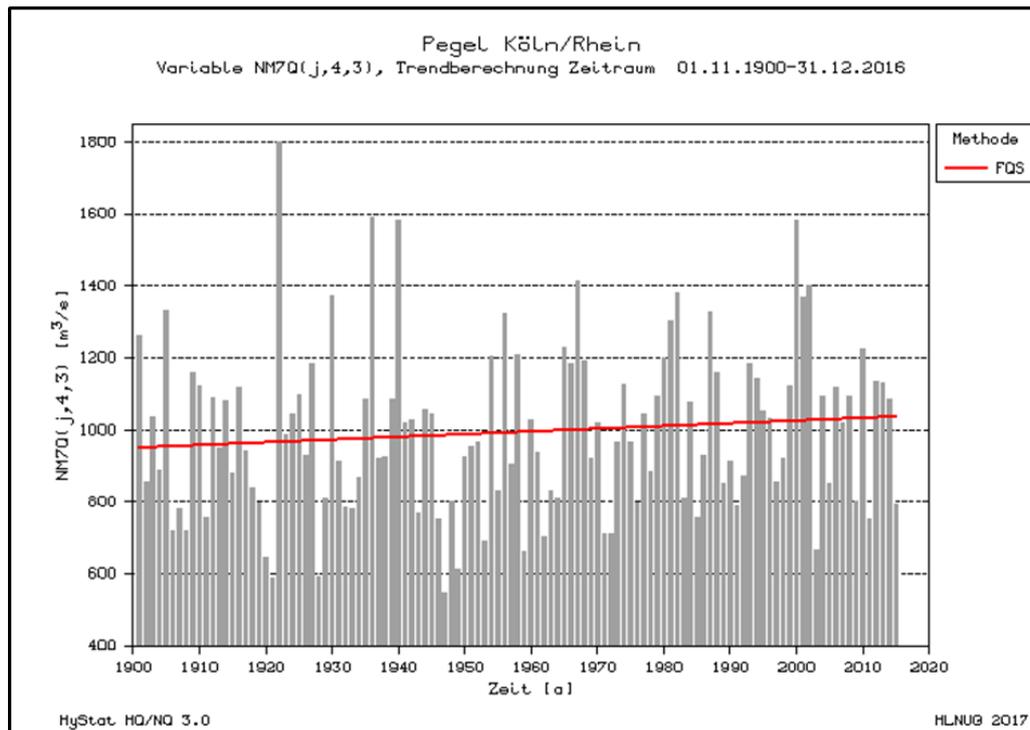


Figure 14 : analyse de tendances de la série NM7Q à l'échelle de Cologne

L'analyse de tendances basée sur la période de référence allant du 1.4.1961 à 31.3.2011 ne permet d'identifier de tendance significative selon Mann-Kendall à aucune des échelles du Rhin. Ceci souligne la séparation de cette période après analyse de rupture et fait ressortir des conditions plus ou moins homogènes pour cette période de référence.

Les résultats des tests de tendance pour le paramètre NM7Q sont présentés dans le tableau suivant (cf. tableau 6).

Tableau 6 : résultats de l'analyse de tendances des séries NM7Q pour toute la période d'analyse et la période de référence homogène (MK = test Mann-Kendall ; FQS/t-test = test t du coefficient de pente des droites).

Echelles	Tendance MK - total	FQS /t-Test - total <sup>4</sup>	Tendance MK 1961-2011	FQS/t-Test 1961-2011
Diepoldsau	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance
Rekingen	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance
Bâle	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance
Maxau	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance
Worms	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance
Mayence	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	+ (p= 0,95)
Kaub	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	+ (p= 0,95)
Andernach	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance
Cologne	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance
Lobith	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance

Les analyses de tendances ne font pas apparaître d'aggravation des étiages durant la période de référence (1961-2010). Si l'on étend la période considérée à toute la période d'observation (depuis le démarrage des données mesurées au début du 20<sup>e</sup> siècle jusqu'en 2015), on obtient en revanche, à l'exception du Rhin inférieur, des tendances à la hausse des débits d'étiage. Les tendances sont également plutôt à la hausse pour les débits d'étiage prolongés sur 21 jours consécutifs (NM21Q) cf. tableau 7) :

<sup>4</sup> Correspond à la ligne de tendance en rouge dans les figures 13 à 16.

Tableau 7 : résultats de l'analyse de tendances des séries NM21Q pour toute la période d'analyse et la période de référence homogène (MK = test Mann-Kendall ; FQS/t-test = test t du coefficient de pente des droites).

Echelles	Tendance MK - total	Erreur standard de prédiction / test t global	Tendance MK 1961-2011	Erreur standard de prédiction / test t 1961-2011
Diepoldsau	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance
Rekingen	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	+ (p= 0,95)
Bâle	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance
Maxau	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance
Worms	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance	+ (p= 0,95)
Mayence	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)
Kaub	+ (p= 0,95)	Aucune tendance	+ (p= 0,95)	+ (p= 0,95)
Andernach	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance	+ (p= 0,95)
Cologne	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance
Lobith	Aucune tendance	Aucune tendance	Aucune tendance	+ (p= 0,95)

Pour les étés (allant du 1.4 au 30.9 de chaque année) de la période de référence, aucune échelle n'affiche de tendance significative des valeurs NM7Q. Pour les hivers (allant du 1.10 au 31.3 de chaque année), on n'observe pas non plus de tendance significative selon Mann-Kendall. Selon le modèle de régression linéaire (FQS), les échelles de Worms, Mayence (cf. figures 15-16) Kaub (à la transition entre le Rhin supérieur et le Rhin moyen) font état d'une tendance à la hausse des valeurs NM7Q. Ceci est éventuellement dû à l'influence des bassins du Neckar et du Main. Ces influences perdent en importance plus en aval.

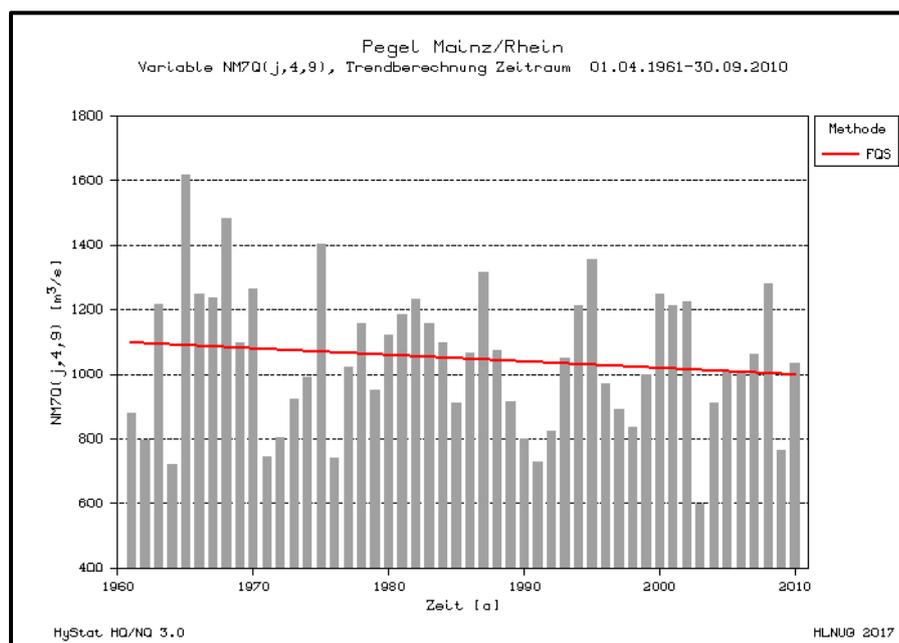


Figure 15 : analyse de tendances de la série NM7Q à l'échelle de Mayence en été (avril-septembre)

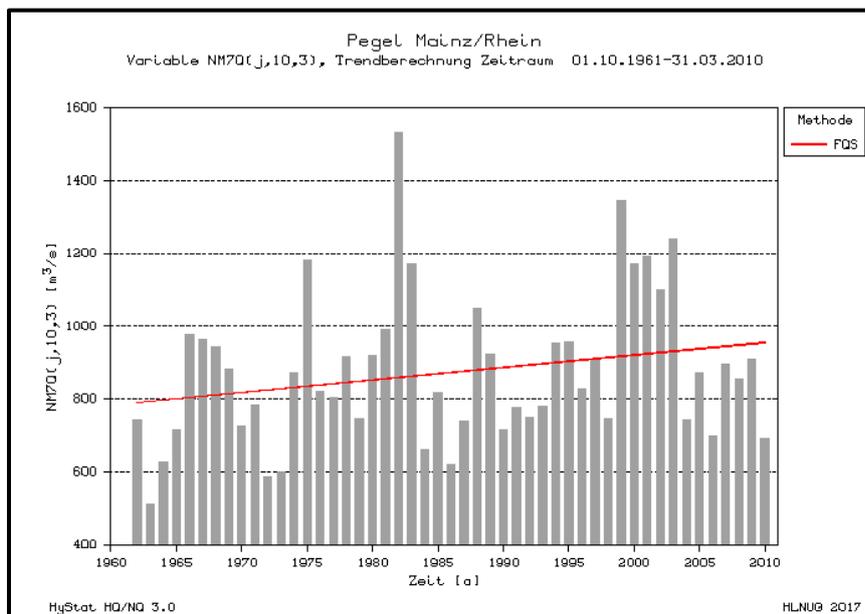


Figure 16 : analyse de tendances de la série NM7Q à l'échelle de Mayence en hiver (octobre-mars)

### 7.3.2 Analyse de probabilité des paramètres d'étiage

Pour classer ultérieurement les débits d'étiage, on a effectué des statistiques des valeurs extrêmes avec les séries de valeurs NMxQ (débits d'étiage moyens les plus faibles sur x jours consécutifs). La répartition des séries d'étiage a été adaptée à la répartition générale des valeurs extrêmes à l'aide de la méthode des moments (L) d'estimation des paramètres (GEV-LM). Les quantiles d'étiage qui en sont déduits sont indiqués dans les tableaux 8 à 12 pour les échelles analysées. Sur la base de ces résultats, il est possible d'affecter aux débits d'étiage considérés une probabilité d'occurrence (période de retour) (voir chap. 7.4). Il convient de tenir compte du fait que les statistiques ont été déterminées sur la base de la période de référence 1961-2010 et qu'elles correspondent aux conditions actuelles (cf. chap. 7.1). Dans ce classement, les débits d'étiage antérieurs (à 1960) semblent afficher une probabilité d'occurrence trop rare. Toutefois, s'ils se produisaient aujourd'hui, les débits et les durées d'étiage survenus avant 1960 correspondraient à ces périodes de retour.

Tableau 8 : débits d'étiage NM1Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3)

Probabilité de débit d'étiage : Type de série <b>NM1Q(j,4,3)</b> , répartition GEV-LM <sup>5</sup> , débits en [m³/s]						
Période de retour	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhin	71,6	60,4	54,7	50,2	45,2	42,0
Rekingen/Rhin	229	189	170	156	140	130
Bâle/Rhin	502	426	390	362	333	314
Maxau/Rhin	618	510	454	410	361	330
Worms/Rhin	693	576	518	471	419	386
Mayence/Rhin	817	687	624	574	521	487
Kaub/Rhin	816	682	617	565	511	476
Andernach/Rhin	955	793	716	656	592	551
Cologne/Rhin	985	821	743	683	619	578
Lobith/Rhin	1053	884	802	739	670	627

<sup>5</sup> Répartition générale des valeurs extrêmes à l'aide de la méthode d'estimation des paramètres avec moments L

Tableau 9 : débits d'étiage NM3Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3)

Probabilité de débit d'étiage : Type de série <b>NM3Q(j,4,3)</b> , répartition GEV-LM, débits en [m <sup>3</sup> /s]						
Période de retour	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhin	82,4	69,3	62,5	57,1	51,0	47,1
Rekingen/Rhin	231	192	173	<b>159</b>	144	134
Bâle/Rhin	509	431	394	365	335	315
Maxau/Rhin	629	519	463	418	369	337
Worms/Rhin	701	583	524	477	426	393
Mayence/Rhin	825	693	629	579	525	491
Kaub/Rhin	825	688	623	571	516	480
Andernach/Rhin	966	801	722	661	595	554
Cologne/Rhin	993	828	750	690	627	587
Lobith/Rhin	1060	892	811	749	682	639

Tableau 10 : Débits d'étiage NM7Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3)

Probabilité de débit d'étiage : Type de série <b>NM7Q(j,4,3)</b> , répartition GEV-LM, débits en [m <sup>3</sup> /s]						
Période de retour	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhin	92,6	77,2	69,3	62,9	55,8	51,2
Rekingen/Rhin	234	194	176	162	147	<b>137</b>
Bâle/Rhin	518	439	402	374	344	325
Maxau/Rhin	644	530	473	427	377	345
Worms/Rhin	716	593	533	486	434	401
Mayence/Rhin	839	702	638	588	535	501
Kaub/Rhin	841	699	632	580	524	489
Andernach/Rhin	982	812	732	670	604	563
Cologne/Rhin	1 010	840	761	701	637	597
Lobith/Rhin	1075	908	829	769	705	665

Tableau 11 : Débits d'étiage NM21Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3)

Probabilité de débit d'étiage : Type de série <b>NM21Q(j,4,3)</b> , répartition GEV-LM, débits en [m <sup>3</sup> /s]						
Période de retour	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhin	103	87,5	80,0	74,0	67,4	63,2
Rekingen/Rhin	246	204	184	169	153	143
Bâle/Rhin	555	464	422	391	358	337
Maxau/Rhin	685	563	505	461	414	384
Worms/Rhin	765	630	568	520	470	439
Mayence/Rhin	895	742	671	618	561	526
Kaub/Rhin	905	744	669	611	550	511
Andernach/Rhin	1059	862	771	700	626	579
Cologne/Rhin	1090	894	803	733	659	613
Lobith/Rhin	1148	957	869	801	729	684

Tableau 12 : Débits d'étiage NM60Q de périodes de retour données, déterminés pour des séries annuelles (j) et rapportés à l'année hydrologique allant d'avril à mars (4,3)

Probabilité de débit d'étiage :						
Type de série <b>NM60Q(j,4,3)</b> , répartition GEV-LM, débits en [m <sup>3</sup> /s]						
Période de retour	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	T=100a
Diepoldsau/Rhin	113	98,7	92,0	86,9	81,3	77,8
Rekingen/Rhin	271	224	203	186	169	<b>159</b>
Bâle/Rhin	644	530	476	435	390	362
Maxau/Rhin	791	647	579	526	469	433
Worms/Rhin	892	729	652	593	530	489
Mayence/Rhin	1046	855	765	695	621	574
Kaub/Rhin	1062	864	770	697	620	570
Andernach/Rhin	1274	1015	887	784	672	600
Cologne/Rhin	1308	1049	921	820	710	640
Lobith/Rhin	1351	1101	983	890	792	729

#### 7.4 Durées des étiages

L'évolution dans le temps des durées annuelles des étiages MaxD (durée maximale d'un épisode continu au-dessous de la valeur seuil MNM7Q) et SumD (nombre total de jours au-dessous de la valeur seuil MNM7Q) a été analysée aux principales échelles du Rhin. Le tableau 13 présente les durées moyennes des étiages sur la période de référence allant du 1.4.1961 au 31.3.2011. A l'exception des échelles de Diepoldsau et de Rekingen, les durées moyennes de non-atteinte du débit MNM7Q sont de l'ordre de 16 à 20 jours. Le nombre moyen de jours au-dessous de la valeur seuil MNM7Q est d'environ 25 jours par an. La valeur seuil n'étant pas atteinte tous les ans, ces valeurs « moyennes » pour les différents épisodes durant lesquels les valeurs sont restées inférieures aux valeurs seuils sont trop basses. Les statistiques des valeurs extrêmes des durées de non-atteinte de certaines périodes de retour permettent de mieux interpréter les données.

Tableau 13 : nombre moyen de jours par an pendant lesquels la valeur seuil MNM7Q n'est pas atteinte

Echelles	MaxD [jours]	SumD [jours]
Diepoldsau	7,6	24,5
Rekingen	24,2	29,2
Bâle	19,6	26,7
Maxau	17,6	25,6
Worms	17,6	25
Mayence	18,1	27
Kaub	17,5	25,1
Andernach	16	24,2
Cologne	16,7	23
Lobith	17,2	24,3

Etant donné que les valeurs n'atteignent pas les seuils définis au cours de certaines années, les séries annuelles ne se prêtent pas à l'analyse statistique des probabilités d'occurrence d'étiages affichant des nombres variables de jours où les valeurs seuils ne sont pas atteintes. Pour cette raison, les séries annuelles ont été élaborées selon la méthode indirecte conformément à la fiche DVWK « Analyse des étiages » (DVWK, 1992) et les statistiques des valeurs extrêmes ont été réalisées avec ces séries. Les résultats obtenus pour les principales échelles du Rhin sur la période de référence 1961-2010 sont présentés dans le tableau 14 ci-dessous :

Tableau 14 : durées (en jours) des étiages annuels restés au-dessous de la valeur seuil MNM7Q.

	<b>T =2a</b>	<b>T =5a</b>	<b>T =10a</b>	<b>T =20a</b>	<b>T =50a</b>	<b>T =100a</b>
Diepoldsau	3,5	9,1	14,0	16,6	21,2	26,3
Rekingen	7,0	30,8	49,0	65,9	85,1	
Bâle	5,1	23,6	34,9	47,5	54,8	83,7
Maxau	4,9	23,4	34,2	47,4	63,7	89,4
Worms	5,4	23,5	35,1	49,3	67,8	
Mayence	5,6	24,5	38,1	55,7	80,9	
Kaub	5,5	23,3	35,7	55,0	74,4	
Andernach	5,8	23,8	39,7	52,9	73,2	85,2
Cologne	5,8	23,8	38,2	52,1	75,1	87,8
Lobith	5,4	26,2	46,1	68,4	88,9	

A l'aide de ce tableau de périodes de retour, les étiages historiques peuvent être affectés à une probabilité d'occurrence quant à la durée de non-atteinte de la valeur seuil (voir chap. 7.5). Pour l'épisode d'étiage 2003, les classifications opérées figurent dans le tableau 15. En ce qui concerne les débits, l'épisode est classé à Bâle comme un événement d'une période de retour de 5 ans et passe à hauteur de Cologne à un épisode d'étiage d'une période de retour de 35 ans. Quant à la durée de l'étiage, l'épisode est à classer comme un étiage d'une période de retour de 5 à 10 ans, à l'exception de l'échelle d'Andernach.

La représentation graphique de l'évolution dans le temps du paramètre MaxD (durée maximale de non-atteinte sur un épisode continu par an) est celle de l'échelle de Kaub (figure 17). Les graphiques de toutes les échelles se trouvent dans l'annexe 3.

Tableau 15 : Classification de paramètres d'étiage de l'épisode 2003 en temps de retour

### Paramètres d'étiage pour l'épisode d'août/septembre 2003

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961-2010	NM7Q sept. 2003	Période de retour sept. 2003	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q sept. 2003	Période de retour sept. 2003
Diepoldsau	92,2	108	< 2	4	2	< 2
Rekingen	238	193	5	7	22	2-5
Bâle	527	431	5	5	20	5
Maxau	645	435	20	5	31	5-10
Worms	720	500	15	5	31	5-10
Mayence	850	596	20	6	33	5-10
Kaub	851	595	20	6	32	5-10
Andernach	998	682	20	6	62	30
Cologne	1028	666	35	6	33	5-10
Lobith	1095	808	15	6	34	5-10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

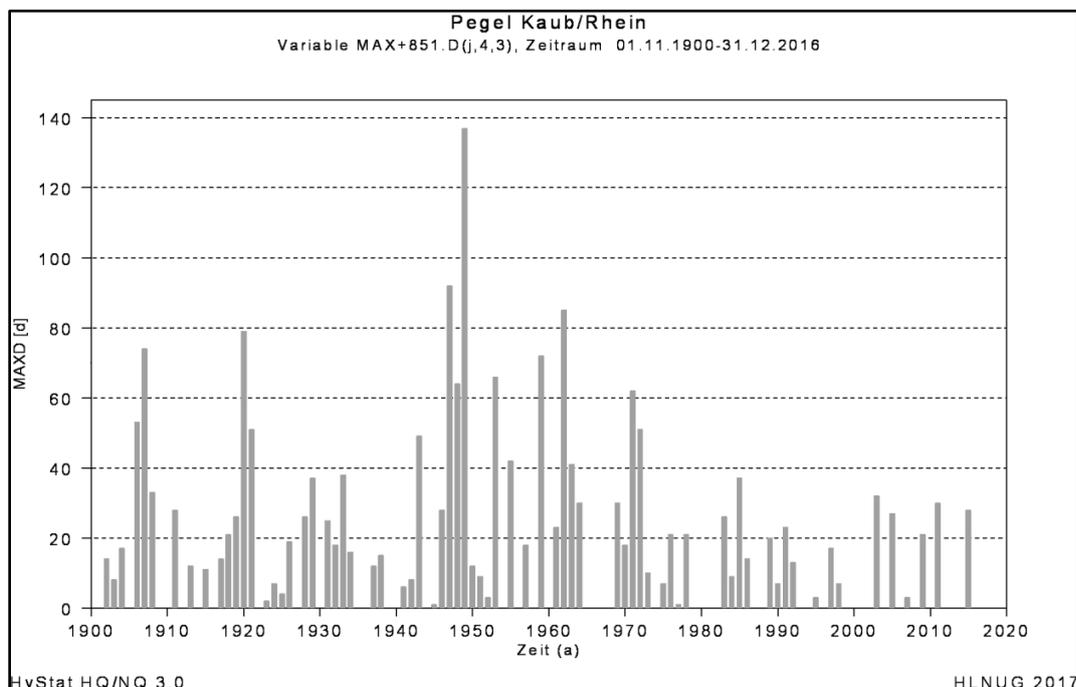


Figure 17 : série annuelle du paramètre Durée de non-atteinte MaxD (en jours) pour l'échelle de Kaub

#### Légende

Pegel	Echelle
Zeitraum	Période
Zeit	Axe temps
(j,4,3)	Année hydrologique d'avril à mars

Les épisodes d'étiage de très longue durée, c'est-à-dire d'environ 80 jours pendant lesquels le MNM7Q n'est pas atteint, sont survenus notamment au début du 20<sup>e</sup> siècle, en 1921, à la fin de années 1940 (avec jusqu'à 138 jours de non-atteinte de la valeur seuil) et autour de 1960. En 1972, les valeurs ne sont pas atteintes pendant encore une soixantaine de jours ; depuis, les durées des étiages sont bien inférieures, souvent de l'ordre de 20 jours et au plus de 38 jours. En tendance, on ne peut déduire de l'évolution dans le temps des durées des étiages une aggravation de ces phénomènes.

### 7.5 Description et classification d'épisodes d'étiage historiques sélectionnés - (exemple : l'épisode d'étiage d'août/septembre 2003)

Les résultats de l'évaluation des épisodes d'étiage historiques sur le Rhin avec les hydrogrammes et les paramètres (affectation des débits et durées à des périodes de retour données), c'est-à-dire les épisodes 1920, 1921, 1943, 1947, 1949, 1953, 1959, 1962, 1963, 1971, 1972, 1976, 1985, 2003, 2006, 2011 et 2015, se trouvent en annexe 2. Ce chapitre décrit en détail l'épisode 2003, pour lequel les Etats riverains du Rhin disposent d'amples informations. Par ailleurs, l'étiage 2003 peut être considéré comme un événement représentatif d'un étiage estival prononcé accompagné de températures élevées de l'eau. Les hydrogrammes, les paramètres et les périodes de retour de l'épisode 2003 sont représentés sous forme de graphiques et de tableaux dans les chapitres 7.1 et 7.4.

Les répercussions de l'étiage 2003 ainsi que des autres épisodes d'étiages historiques ont été recensées et intégrées dans le chapitre général 6.3 sur les impacts.

#### 7.5.1. Evolution météorologique durant l'épisode d'étiage 2003

L'année 2003 a commencé par des précipitations supérieures à la moyenne (de novembre 2002 à janvier 2003) avant de se transformer en une année sèche prononcée. A partir de février 2003, un anticyclone s'est développé au-dessus de l'Europe de l'Ouest, bloquant ainsi les masses d'air occidentales humides et permettant l'arrivée de masses d'air chaudes et sèches provenant d'Afrique du Nord. Ces conditions ont entraîné un déficit prononcé de précipitations (notamment en février, mars et août 2003) dont l'impact s'est fait sentir dans tous les Etats riverains du Rhin à partir de juillet 2003. Cette situation météorologique a donné lieu à une sécheresse et à des étiages de plus en plus sensibles et prolongés jusqu'en octobre 2003 (puis à des précipitations supérieures à la moyenne). Une sécheresse météorologique, liée à une canicule (notamment en août 2003) s'est étendue de mars à septembre 2003 sur de grandes parties de l'Europe de l'Ouest, Centrale et du Sud. Les faibles niveaux d'eau et l'ensoleillement intensif ont entraîné également un fort réchauffement des eaux.

### **7.5.2. Evolution hydrologique durant l'épisode d'étiage 2003**

Conséquence des conditions décrites ci-dessus et notamment des faibles précipitations, une période d'étiage s'est installée dans le bassin du Rhin de la fin juin/début juillet 2003 à début octobre 2003, date à laquelle les niveaux d'eau sont remontés brutalement sous l'effet de précipitations. Les débits les plus faibles ont été observés fin septembre 2003. Dans les grands affluents rhénans canalisés comme le Neckar, le Main et la Moselle, les débits ont également été plus faibles que la normale. En raison de l'apport estival de l'eau issue de la fonte des neiges dans le bassin alpin et de l'effet compensateur du lac de Constance, la période d'étiage est apparue plus tardivement dans le Rhin que dans les grands affluents et d'autres fleuves (Elbe, Oder).

Sous l'effet de la chaleur exceptionnelle en haute montagne, qui a entraîné une forte fonte de la neige et des glaciers, les rivières du bassin alpin (comme le Rhin alpin) avaient beaucoup plus d'eau qu'à l'habitude (échelle de Diepoldsau : pas d'étiage en septembre 2003). Les centres de sécheresse des cours d'eau étaient le Jura et le bas Mittelland (l'échelle de Bâle a été plus touchée par l'étiage que celle de Rekingen). Dès mars/avril 2003, le débit a baissé dans le bassin allemand du Rhin, mais n'est pas passé au-dessous du débit d'étiage moyen pluriannuel (MNQ<sub>1931/2000</sub>) avant la mi-août 2003. Combiné à des températures atmosphériques extrêmement élevées à la mi-août 2003, le niveau d'eau dans le Rhin est passé à des valeurs très basses (par ex. 65 cm à Coblenche le 15 août 2003) jusqu'au troisième tiers de septembre 2003. Le plus faible débit du Rhin aux Pays-Bas (échelle de Lobith) en 2003 a été très similaire à celui de 1976 (environ 800 m<sup>3</sup>/s à Lobith) et a donné lieu à de sérieux problèmes, mais trois périodes d'étiage se sont succédées en 1976 et les étiages ont duré globalement plus longtemps.

Ces faibles niveaux d'eau et l'ensoleillement intensif ont entraîné un fort réchauffement des eaux. Plusieurs records de température ont été battus. Les températures ont atteint jusqu'à 26 °C dans le haut Rhin et 28 °C sur le reste du Rhin. Le réchauffement a été variable dans les affluents. Les rivières canalisées (Moselle, Main, Neckar, Sarre) par exemple ont été plus touchées par le réchauffement que les rivières à écoulement libre.

## **8. Eventuels impacts du changement climatique sur les futures conditions d'étiage du Rhin**

### **8.1 Résultats des analyses disponibles dans le bassin du Rhin**

Les interventions multiples de l'homme sur le régime des débits d'étiage dans le Rhin n'expliquent pas clairement les impacts du changement climatique constatés jusqu'à présent. A la lecture de l'évolution des débits d'étiage aux échelles du Rhin, on relève une atténuation des étiages extrêmes au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Selon la source Belz et al. (2007), les échelles de Bâle, de Maxau, de Worms, de Kaub, d'Andernach et de Cologne (hiver hydrologique uniquement) montrent sur la période 1901 à 2000 des débits tendanciellement à la hausse pour NM7Q sur l'année hydrologique ou l'hiver hydrologique. Si l'on observe la période 1951-2000, on note que la tendance à la hausse des débits est encore confirmée pour les échelles de Bâle, Maxau et Worms alors qu'aucune tendance fiable n'est visible pour les autres échelles plus en aval. Ici, les

tendances NM7Q à la baisse observées sur cette période pour les affluents rhénans Lahn et Moselle font effet.

A partir des projections de débit déterminées à l'aide de projections climatiques, on peut extraire et quantifier les impacts du changement climatique sur les débits d'étiage pour une période de référence (1971-2000) et pour une période d'avenir (2021-2050 « futur proche » ou 2071-2100 « futur lointain ») par comparaison systématique des paramètres d'étiage. Il convient ici de garder à l'esprit que les scénarios climatiques se fondent sur différentes hypothèses d'évolution future des émissions et qu'un grand nombre de modèles globaux et régionaux existent et qu'aucun d'entre eux n'est à favoriser a priori. Pour les raisons susmentionnées, il est nécessaire d'évaluer plusieurs projections de débit distinctes sous forme « d'ensemble » pour pouvoir estimer les impacts et en tirer des fourchettes des modifications futures possibles des débits d'étiage.

Le **GE KLIMA de la CIPR** a rassemblé des fourchettes de variation du débit NM7Q pour l'été hydrologique et l'hiver hydrologique en se fondant sur les résultats du projet « **Rheinblick 2050** » de la CHR (Görger et al. 2010).

Tableau 16 : Fourchette de modification du NM7Q à différentes échelles du Rhin (source : rapport CIPR n° 188, CIPR, 2011)

Paramètre	Echelles	Corridors de scénarios	
		Modification en % Futur proche	Modification en % Futur éloigné
NM7Q été hydrologique (mai-oct.)	Bâle	de -10 % à +10 %	de -20 % à -10 %
	Maxau	de -10 % à +10 %	de -20 % à -10 %
	Worms	de -10 % à +10 %	de -25 % à -10 %
	Kaub	de -10 % à +10 %	de -25 % à -10 %
	Cologne	de -10 % à +10 %	de -30% à -10%
	Lobith	de -10 % à +10 %	de -30 % à -10 %
NM7Q hiver hydrologique (nov.-avril)	Bâle	de +5 % à +15 %	de 0 % à +15 %
	Maxau	de 0 % à +10 %	de -5 % à +15 %
	Worms	de +5 % à +15 %	de -5 % à +15 %
	Kaub	de 0 % à +15 %	de -5 % à +15 %
	Cologne	de 0 % à +15 %	de 0 % à + 20%
	Lobith	de 0 % à +15 %	de -5 % à +15 %

#### Code de couleurs utilisé pour les signaux de modification au 21<sup>e</sup> siècle (légende)

Orange	Tendance à la baisse
Gris	Aucune tendance nette
Bleu	Tendance à la hausse

Les résultats pour le futur proche évoluent dans une fourchette comprise entre une baisse de -10 % et une hausse de +10 % des débits NM7Q pour l'été hydrologique. Pendant l'hiver hydrologique, les modifications sont nulles ou faibles (0 à +5 %) dans la partie basse de la fourchette et peuvent atteindre globalement 15 % dans la partie haute de la fourchette pour les échelles du Rhin. Dans le futur lointain, les impacts se décalent en tendance vers des débits d'étiage moins prononcés et les fourchettes affichent intégralement des pourcentages de modifications négatifs pendant l'été hydrologique.

A propos des évolutions futures des températures de l'eau pendant les épisodes d'étiages estivaux, l'analyse comparative réalisée par le **groupe d'experts STEM** de la CIPR (CIPR, 2014) montre que les températures moyennes de l'eau en août sur le profil longitudinal du Rhin augmentent d'env. 1,5 °C entre la période de référence choisie à l'époque pour cette analyse (2001-2010) et le futur proche. Cette hausse est d'env. 3,5 °C pour le futur éloigné (2071-2100). L'échauffement est d'origine climatique, sans effet

additionnel significatif des rejets thermiques<sup>6</sup> (CIPR, 2015). Pour l'avenir proche, on estime en outre que le nombre (critique pour l'écologie) de jours où la température de l'eau dépassera 25 °C augmentera par rapport à la période de référence et qu'il pourra même doubler en situation de faible débit. De plus, le nombre de jours avec dépassement de 25 °C et de 28 °C augmentera fortement dans le futur éloigné. Ces enseignements montrent que des étiages estivaux (comme par ex. ceux de 2003 et de 2006) pourraient acquérir une importance croissante sur le Rhin à l'avenir en raison des répercussions qu'ils auraient sur l'écologie.

Selon une analyse d'ensemble réalisée pour les échelles du Rhin dans le cadre du projet **KLIWAS** (BMVBS (ministère fédéral allemand des Transports, 2015), le paramètre NMQ7 évolue dans un futur proche sur une année hydrologique (1.04 à 31.03) dans une fourchette de -5 % à +10 %. Dans un futur lointain, cette fourchette donne plutôt des débits régressifs évoluant entre -10 %/-20 % et +10 %. Pour déterminer l'évolution des durées d'étiage, on a analysé dans le projet KLIWAS la modification du débit dit 'd'étiage équivalent' (GIQ) à l'échelle de Kaub (719 m<sup>3</sup>/s, ce qui correspond à peu près à un NM7Q5). Alors que les débits mesurés à l'échelle de Kaub pendant la période de référence sont inférieurs au GIQ pendant 18 jours en moyenne, on obtient une fourchette de 10 à 25 jours pour le futur proche, c'est-à-dire à une estimation oscillant entre faible baisse et faible hausse. Pour le futur lointain, la fourchette affiche 15 à 50 jours, ce qui correspond plutôt à une nette augmentation des jours où le débit est inférieur au GIQ.

Au sein du cercle de travail **KLIWA**, on s'est basé sur le modèle régional COSMO-CLM4.8 et le scénario d'émissions A1B et constaté pour 3 runs de modélisation une baisse constante des paramètres d'étiage pour le futur proche pendant l'année hydrologique (Tab. 17) (HYDRON, 2017).

Tableau 17 : modifications des conditions d'étiage pour le futur proche à l'échelle de Kaub (modification de débit en %, durée de modification en jours)

	MNQ	MNM7Q	MNM21Q	maxD < MNQ	sumD < MNQ
run1	-8,9 %	-8,8 %	-9,2 %	+ 12,6 j	+ 17,8 j
run2	-8,9 %	-9,0 %	-8,7 %	+ 6 j	+ 4,6 j
run3	-4,0 %	-4,4 %	-6,2 %	+ 8,1 j	+ 10,1 j

Ces résultats ne présentent cependant pas de fourchette modélisée au sens où seraient utilisées plusieurs chaînes de modélisation distinctes, mais ils mettent en évidence la variation d'une chaîne de modélisation dans différentes conditions initiales. A l'échelle de Kaub, on relève pour ces projections de débit des baisses de débit d'étiage comprises entre 5 et 10 %. Les durées de non-atteinte de la valeur seuil MNQ utilisée ici augmentent et sont comprises entre 5 et 17 jours. Ces modifications résultent pour l'essentiel de celles, très marquées, survenant pendant l'été hydrologique (baisses du NM7Q comprises entre -5 et -13 %). Pour l'hiver hydrologique, on obtient, en fonction du run observé, soit des baisses du NM7Q (run 2 : -7,2 %), soit des modifications minimales (run 2 : -1,2 %, run 3 : 0,4 %).

<sup>6</sup> Ces remarques sont déjà dépassées, plusieurs blocs nucléaires ayant entre-temps été arrêtés dans le bassin du Rhin. Des projections fiables sur l'évolution des rejets thermiques permettraient éventuellement d'améliorer les projections sur la température de l'eau. (CIPR, 2015)

## 8.2 Analyse des projections de débit COSMO-CLM4.8-A1B

En regard de l'augmentation non critique des débits d'étiage, on a choisi d'analyser plus en détail, parmi les multiples variantes des évolutions futures possibles, la projection de débit COSMO-CLM4.8, c'est-à-dire celle dont les répercussions sont jugées les moins avantageuses en cela qu'elle prévoit des débits d'étiage régressifs, pour décrire les impacts consécutifs aux étiages. Pour atteindre une comparabilité directe avec la méthode d'analyse appliquée au sein du GE LW, ces projections de débit ont été rapportées à l'année hydrologique et évaluées par rapport à des périodes de retour. Les trois runs ayant une probabilité égale, ils ont été examinés et évalués sous forme de collectif pour le futur proche (2021-2050) (cf. tableau 18).

Tableau 18 : paramètres d'étiage pour la projection de débit COSMO-CLM4.8-A1B

Projections des modèles COSMO-CLM4.8-A1B : <b>NM7QT</b> , débits en [m <sup>3</sup> /s]						
Récurrance :	T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a	MNM7Q
Worms/Rhin 1971-2000 simulé	748	643	595	558	520	762
Worms/Rhin 2021-2050 simulé	696	581	529	489	446	711
(2021-2050) - (1971-2000) [%]	-7 %	-10 %	-11 %	-12 %	-14 %	-7 %
Kaub/Rhin 1971-2000 simulé	909	765	700	651	599	929
Kaub/Rhin 2021-2050 simulé	826	684	620	572	521	846
(2021-2050) - (1971-2000) [%]	-9 %	-11 %	-11 %	-12 %	-13 %	-9 %
Cologne/Rhin 1971-2000 simulé	1077	894	810	746	679	1101
Cologne/Rhin 2021-2050 simulé	972	792	709	647	581	996
(2021-2050) - (1971-2000) [%]	-10 %	-11 %	-12 %	-13 %	-14 %	-10 %

Selon ce scénario, les valeurs MNM7Q baissent progressivement dans le futur proche (2021-2050) en aval de Worms (-7 %) et de Kaub (-9 %) jusqu'à Cologne (-10 %). Les valeurs n annuelles NM7Q définies comme valeurs seuils de débit d'étiage dans le chapitre 9.1 montrent pour toutes les échelles des modifications très similaires, avec des baisses allant de -10 % pour un NM7Q quinquennal à -14 % pour un NM7Q cinquantennal.

Pour exposer la modification de la durée maximale de non-atteinte ininterrompue (MaxD) de la valeur seuil NM7Q2, on a rassemblé dans le tableau 19 le nombre de jours pendant lesquels le NM7Q2 déterminé sur la période de référence n'a pas été atteint par un épisode d'étiage pour différentes récurrences.

Avec des débits d'étiage globalement en régression et le maintien de la valeur seuil NM7Q2 de la période de référence, on obtient, comme attendu, des durées prolongées inférieures à cette valeur seuil. Alors que l'on obtient uniquement 4 jours de non-atteinte du seuil pour un épisode moyen biennal sur la période de référence modélisée, ce nombre augmente fortement dans le scénario d'avenir avec un chiffre compris entre 11 et 13. Pour les événements plus rares de récurrence de 5 à 20 ans, les jours inférieurs au seuil augmentent encore de moitié à trois quarts par rapport à la période de référence.

Tableau 19 : projection modélisée de la durée MaxD &lt; NM7Q2 en jours

Projections des modèles COSMO-CLM4.8-A1B : <b>projection modélisée de la durée MaxD &lt; NM7Q2(ETAT REEL) en [jours]</b>						
Réurrence :		T=2a	T=5a	T=10a	T=20a	T=50a
Worms simulé 1971-2000	< 748 m <sup>3</sup> /s	4	22	37	47	61
Worms simulé 2021-2050	< 748 m <sup>3</sup> /s	11	33	55	76	
(2021-2050) - (1971-2000) [%]		<b>184 %</b>	<b>52 %</b>	<b>49 %</b>	<b>62 %</b>	
Kaub simulé 1971-2000	< 909 m <sup>3</sup> /s	4	24	39	51	62
Kaub simulé 2021-2050	< 909 m <sup>3</sup> /s	13	37	61	80	
(2021-2050) - (1971-2000) [%]		<b>253 %</b>	<b>54 %</b>	<b>55 %</b>	<b>58 %</b>	
Cologne simulé 1971-2000	< 1077 m <sup>3</sup> /s	4	23	37	46	54
Cologne simulé 2021-2050	< 1077 m <sup>3</sup> /s	13	38	58	81	
(2021-2050) - (1971-2000) [%]		<b>260 %</b>	<b>63 %</b>	<b>57 %</b>	<b>77 %</b>	

Les méthodes et intervalles de temps utilisés sont ceux appliqués à l'étude dans son ensemble, de sorte que les impacts peuvent être mis en relation avec les autres résultats. Les résultats correspondent à une projection avec de légères baisses des paramètres d'étiage (baisse de -4 % à -9 % pour le MNQ de l'année hydrologique, voir chap. 8.1), alors que l'on trouve aussi dans les fourchettes des autres analyses des projections avec des hausses de débit dans le futur proche.

### 8.3 Impacts à prendre en compte sous l'aspect de la prévention des étiages

Pour les paramètres d'étiage et sur la base de l'année hydrologique (1<sup>er</sup> avril au 31 mars), il ressort des analyses disponibles une fourchette allant d'une baisse de -5 % à une hausse de 10 % pour le futur proche. Les pourcentages de modification des années et semestres hydrologiques d'autres fourchettes ne peuvent pas être directement comparés car ils ne correspondent pas au régime d'étiage du Rhin. Quand on utilise l'année hydrologique ou l'hiver/été hydrologique, les périodes d'étiage typiques du Rhin, qui vont de septembre à décembre, sont interrompues et ne sont pas recensées comme épisode complet. Il est impossible d'expliquer clairement si les débits d'étiage baissent déjà dans le futur proche ou si cette baisse ne se manifeste que dans le futur éloigné. Pour le futur proche, il faut partir - au sens d'une **vision préventive** - du cas le moins avantageux d'une baisse modérée des débits d'étiage de l'ordre de 5 à 10 %. Les répercussions d'un tel scénario ont été analysées et débouchent sur des baisses des valeurs d'étiage T-annuelles NM7QT de 7 % à 14 %. La multiplication par trois des durées de non-atteinte qui accompagnent ce scénario est très élevée pour un événement fréquent d'une récurrence de deux ans alors qu'il correspond à une augmentation de moitié à trois quarts pour les événements plus rares d'une récurrence de 5 à 20 ans.

Les résultats présentés ici donnent une image d'un futur possible fondé sur les hypothèses et conditions de départ retenues dans le cadre de l'analyse. D'autres projections de débit mèneraient à d'autres résultats.

## 9. Monitoring des étiages

Pour pouvoir surveiller les étiages et leur occurrence ou pour analyser l'apparition de phénomènes d'étiage dans des chroniques de débit, il est nécessaire de définir des valeurs seuils pour définir le stade à partir duquel on parle d'étiage et pour en classifier l'intensité.

### 9.1 Détermination d'une classification de conditions de développement d'étiages

On parle d'étiage quand le débit en présence est inférieur à la valeur seuil spécifique fixée pour le cours d'eau considéré. On peut faire appel à des valeurs fixes, la plupart du temps des MNQ tirés de chroniques prolongées ou des paramètres similaires. On peut également se référer à des paramètres variables dans le temps (généralement mensuels) pris comme valeurs comparatives selon les cas considérés. Pour différencier les intensités des étiages entre eux, on doit pouvoir se fonder sur des valeurs seuils échelonnées permettant de classer l'événement de « normal » à « extrême ». Pour donner une vue synoptique des échelles analysées le long du Rhin, on classe les épisodes d'étiage par rapport à des valeurs NM7Q pour différents intervalles de récurrence se rapportant à de longues chroniques de référence (1961-2010) de chaque échelle considérée. Le tableau 20 affiche les classes d'étiage sélectionnées en fonction de leur intensité et désignation, de même que sur la base d'une légende de couleurs faisant ressortir les débits inférieurs aux seuils d'étiage définis.

Tableau 20 : définition de classes d'étiage

Couleur	Classe	Intensité	Désignation
vert	0	$\geq \text{NM7Q}(T2)$	normal = pas d'étiage
jaune	1	$< \text{NM7Q}(T2)$	étiage fréquent
orange	2	$< \text{NM7Q}(T5)$	étiage moins fréquent
rouge	3	$< \text{NM7Q}(T10)$	étiage rare
violet	4	$< \text{NM7Q}(T20)$	étiage très rare
noir	5	$< \text{NM7Q}(T50)$	étiage extrêmement rare

(ajusté avec les CIPMS)

Les faibles débits sont considérés normaux tant que les valeurs ne sont pas inférieures au NM7Q bisannuel pris comme référence. En cas de non-atteinte de ce premier seuil, l'épisode est attribué à la classe « étiage fréquent » tant que les débits ne passent pas au-dessous du seuil d'un NM7Q quinquennal. Si des débits inférieurs aux classes NM7Q(T5) à NM7Q(T10) surviennent, l'épisode est alors désigné « étiage moins fréquent ». On parle « d'étiage rare » quand le débit est inférieur à un NM7Q décennal et « d'étiage très rare » quand le débit passe sous le seuil du NM7Q bidécennal. La classe d'étiage la plus élevée, celle d'un « étiage extrêmement rare » est atteinte à une échelle donnée quand les débits sont inférieurs à un NM7Q cinquantiennal. Cette classification a été fixée après ajustement avec les CIPMS, ce qui fait que le monitoring des étiages de la Moselle effectué par les CIPMS se fonde sur les mêmes classifications que celles appliquées sur le Rhin. Le chapitre 7.3.2 regroupe les analyses statistiques correspondantes de détermination des paramètres requis pour les valeurs seuils et on y trouve dans les tableaux 8 à 12 les valeurs (T) NM7Q à appliquer aux échelles du Rhin.

On a renoncé à relier explicitement les valeurs seuil d'étiage avec les durées d'étiage non atteintes pour conserver des valeurs seuils simples et compréhensibles. Pour le monitoring des étiages, il apparaît cependant utile de suivre également la durée de non-atteinte des seuils respectifs (en jours) en plus de la classe d'étiage atteinte.

## 9.2 Validation de la classification des étiages à l'aide des chroniques

Les chroniques des échelles ont été soumises à un « monitoring rétrospectif » à l'aide de la classification des étiages définie dans le chapitre précédent.

A titre d'exemple, la figure 18 montre pour les échelles de Bâle, de Kaub et de Lobith l'apparition annuelle de ces classes d'étiage avec la durée correspondante des jours de non-atteinte. Les épisodes d'étiage historiques décrits dans le chapitre 7.1 et en annexe 2 peuvent être encore mieux appréhendés avec ce monitoring et des événements non décrits jusqu'à présent sont rendus visibles. Les résultats de toutes les échelles analysées figurent en annexe 4. Les classes d'étiages prononcés sont aisément reconnaissables, de même que les épisodes d'étiage nettement plus longs dans l'ensemble survenus dans la première moitié du siècle dernier. Les événements de 1920/1921, de 1946-1949, de 1962 et de 1971 sont clairement mis en relief au niveau de presque toutes les échelles. Sur toute la période considérée, la classe 5 correspondant à un « étiage extrêmement rare » est atteinte trois fois aux échelles de Bâle et Kaub et quatre fois à l'échelle de Lobith néanmoins pour des événements distincts. Ceci est dû aux régimes hydrologiques différents de ces deux échelles. La classe 4 d'un « étiage très rare » est atteinte à l'échelle de Bâle pour 6 années à Kaub pour 8 années et à Lobith pour 7 années. Alors que des durées globales de non-atteinte de 140 jours sont constatées pour 3 années à l'échelle de Bâle, on relève à l'échelle de Kaub 4 années avec 140 jours de non-atteinte marquée, dont deux comptent même 180 jours inférieurs au seuil définissant l'étiage. A l'échelle de Lobith, la durée de 140 jours est trois fois dépassée et l'on atteint même un total de 215 jours en 1921. Les épisodes d'étiage sont moins prononcés depuis le milieu des années 1970 : on note en 2005 à l'échelle de Bâle un seul cas d'atteinte de la classe 3 d'un « étiage rare » ( $T < 10$  à 20a) et deux cas (1985 et 2003) à l'échelle de Kaub, la classe 3 étant atteinte en 1991 et 2003 à Lobith. Après l'événement de 2003 nettement ressenti, on compte encore à l'échelle de Kaub 4 années où est atteinte la classe 2 « d'étiage moins fréquent ».

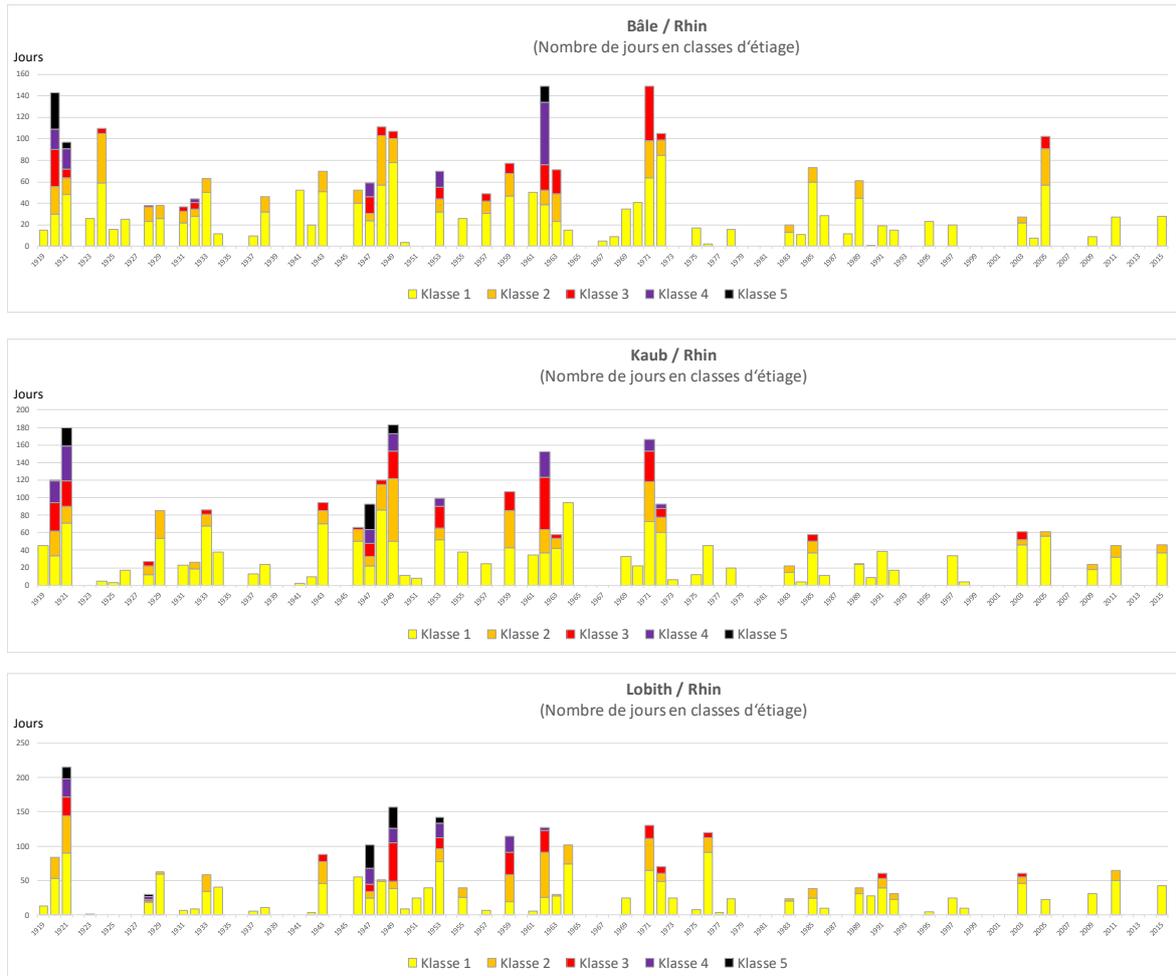


Figure 18 : monitoring rétrospectif aux échelles de Bâle, Kaub et Lobith

Les tableaux 21 à 23 mettent en comparaison le nombre moyen de jours dans l'année avec débits correspondant aux classes d'étiage définies pour différentes décennies et périodes.

Tableau 21 : nombre annuel de jours d'étiage à l'échelle de Bâle

Année	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
1921 - 1930	22,3	8,8	1,4	1,9	0,6
1931 - 1940	15,4	4,5	1,0	0,3	0,0
1941 - 1950	32,6	10,6	3,0	1,3	0,0
1951 - 1960	13,6	4,4	2,7	1,5	0,0
1961 - 1970	21,7	3,9	4,6	5,8	1,5
1971 - 1980	18,4	4,8	5,7	0,0	0,0
1981 - 1990	17,1	3,6	0,0	0,0	0,0
1991 - 2000	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0
2001 - 2010	9,6	3,9	1,1	0,0	0,0
1921 - 2010	17,6	4,9	2,2	1,2	0,2
1921 - 1960	21,0	7,1	2,0	1,3	0,2
1961 - 2010	14,9	3,2	2,3	1,2	0,3

Tableau 22 : nombre annuel de jours d'étiage à l'échelle de Kaub

Année	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
1921 - 1930	16,2	6,0	3,4	4,0	2,1
1931 - 1940	18,5	2,0	0,5	0,0	0,0
1941 - 1950	30,1	14,1	6,2	3,6	3,9
1951 - 1960	16,6	5,5	4,7	0,9	0,0
1961 - 1970	26,3	3,9	6,3	2,9	0,0
1971 - 1980	21,6	6,3	4,5	1,8	0,0
1981 - 1990	10,0	2,1	0,8	0,0	0,0
1991 - 2000	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0
2001 - 2010	12,0	1,7	0,9	0,0	0,0
1921 - 2010	17,9	4,6	3,0	1,5	0,7
1921 - 1960	20,4	6,9	3,7	2,1	1,5
1961 - 2010	15,9	2,8	2,5	0,9	0,0

Tableau 23 : nombre annuel de jours d'étiage à l'échelle de Lobith

Année	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
1921 - 1930	17,0	6,0	2,9	3,1	2,0
1931 - 1940	10,8	2,4	0,0	0,0	0,0
1941 - 1950	22,6	5,3	7,8	4,4	6,5
1951 - 1960	19,5	7,1	4,8	4,5	0,8
1961 - 1970	15,9	9,5	3,2	0,4	0,0
1971 - 1980	26,6	7,9	3,6	0,0	0,0
1981 - 1990	11,5	2,4	0,0	0,0	0,0
1991 - 2000	10,2	2,2	0,8	0,0	0,0
2001 - 2010	10,0	0,9	0,6	0,0	0,0
1921 - 2010	16,0	4,9	2,6	1,4	1,0
1921 - 1960	17,5	5,2	3,9	3,0	2,3
1961 - 2010	14,8	4,6	1,6	0,1	0,0

Les tableaux 21 à 23 permettent de reconnaître la variation des durées moyennes de non-atteinte, majoritairement concordante pour les échelles, au cours des décennies. Les années 1940 correspondent à la décennie de loin la plus marquante. On compte pour cette décennie à Bâle et Kaub environ 300 jours, et à Lobith 226 jours, de débit attribués à la classe 1. Pour Bâle, 106 jours sont placés en classe 2, 141 jours à Kaub et uniquement 53 à Lobith. Pour les classes d'étiage 3 à 5, le nombre de jours de non-atteinte est nettement plus élevé à Kaub, avec 137 jours, qu'à Bâle (43). Il atteint même 187 jours à Lobith. La décennie la moins marquée par les étiages est celle des années 1990. On relève ici à Bâle 77 jours de passage en classe 1 (94 à Kaub, 102 à Lobith) et la classe 2 n'est atteinte ni à Kaub ni à Bâle ; elle l'est en revanche à Lobith pendant 22 jours. A Lobith également, la classe 3 est atteinte pendant 8 jours dans les années 1990 alors que la décennie allant de 2001 à 2010 est encore plus rare en étiages que celle des années 1990.

La comparaison entre la période allant de 1921 à 1960 et la période de référence 1961-2010 met clairement en évidence aux échelles de Kaub et de Lobith une régression des situations d'étiage dans la période de référence la plus récente, en particulier pour ce qui concerne les classes 2 à 5 d'étiages plus rares.

L'adéquation des valeurs seuils fixées est confirmée par vérification des seuils d'étiage et des classes d'étiage comparés aux événements historiques. Les seuils d'étiage sont suffisamment sensibles pour détecter les événements plus petits mais également plus fréquents des 40 dernières années et pour différencier les différentes intensités des épisodes d'étiage. D'autre part, les classes d'étiage définies reflètent également bien les grands événements historiques, qui sont par nature plus rarement atteints, mais qui ressortent nettement du collectif, en particulier au travers de la représentation des durées totales de jours de non-atteinte des seuils d'étiage.

On peut donc confirmer que les valeurs seuils fixées pour les étiages sont appropriées pour un futur monitoring, à condition toutefois que l'on porte également attention au nombre de jours de non-atteinte continue de ces valeurs seuils en plus des débits d'étiage.

## 10. Conclusions

### Régime hydrologique d'étiage du Rhin

Les apports quantitatifs des différents sous-bassins du Rhin sont essentiels pour déterminer le régime naturel d'étiage. Les évaluations des valeurs de débit mesurées dans quelques échelles le long du Rhin mettent également en relief pour les étiages l'importance, sur tout le cours du Rhin, de l'apport de débit issu des zones alpines et préalpines. Le régime hydrologique variable, avec son minimum hivernal en zone nivale (jusqu'à Bâle) et son minimum estival en zone pluviale (en aval de Worms) garantit en outre une certaine résilience du Rhin dans son ensemble face aux épisodes d'étiages extrêmes.

Les étiages historiques surviennent le long du cours du Rhin avec des intensités et durées variables, en particulier dans le cas des événements extrêmes. Il peut arriver par exemple qu'un événement centennal survenant dans la partie amont du Rhin supérieur (Bâle) s'atténue par la suite pour se transformer en un étiage d'une période de retour de 15 ans à Lobith (épisode de mars à mai 1921). A l'opposé, on trouve des épisodes de récurrence modérée à Bâle (période de retour de 10 à 40 ans) devenant des événements plus que centennaux sur le Rhin inférieur (étiages de 1947 et de 1959). Dans une période plus récente, les plus petits épisodes d'étiage présentent des caractéristiques plutôt similaires (1971 : récurrence de 20 à 30 ans ; 1976 : récurrence de 2 à 5 ans, 1985 : récurrence de 10 ans ; 2003 : récurrence de 5 à 20 ans ; 2011 : récurrence de 10 ans ; 2015 : récurrence de 5 à 10 ans).

### Influences sur les étiages

Il ressort de l'inventaire des influences (interventions) agissant sur le débit d'étiage du Rhin que le bilan des apports et dérivations est positif. Par ailleurs, l'impact de la gestion des retenues en zone alpine se traduit surtout par une hausse significative des débits d'étiage depuis les années 1960-70 pour les épisodes les plus bas, c'est-à-dire ceux survenant pendant l'hiver hydrologique, conformément au régime des débits du Rhin. Depuis le milieu des années 1990, des transferts d'eau sont effectués depuis le bassin du Danube vers celui du Main (système de transfert achevé en 1999). Au total, les influences positives sur le régime d'étiage du Rhin sont dominantes.

### Vulnérabilités

L'inventaire des usages actuels fait apparaître de multiples vulnérabilités économiques face aux étiages mais leurs impacts restent toutefois difficiles à quantifier. A l'échelle transfrontalière, la navigation et les personnes et secteurs économiques dépendant de cette activité sont touchés. La quantité d'électricité produite par les centrales hydroélectriques baisse quand les débits régressent. Des dégradations écologiques sont surtout observées au cours des étiages estivaux. En outre, les étiages font naître un risque d'intrusion d'eau salée, en particulier dans les hydrosystèmes régionaux du delta du Rhin, et les digues de tourbe qu'on y trouve peuvent devenir instables en période d'étiage.

### Analyse de chroniques de débit

L'évaluation de chroniques montre que les étiages du Rhin sont nettement plus prononcés dans la première moitié du siècle passé que dans les 50 dernières années, avec des débits également plus bas et plus longtemps inférieurs aux seuils fixés. On note aussi une tendance à la hausse significative des débits d'étiage du Rhin entre Diepoldsau et Andernach sur l'ensemble de la période considérée de 1901 à 2010. Cette tendance est surtout due à l'effet de la gestion des retenues en zone alpine. Les précipitations annuelles tendanciellement en hausse relevées au cours du 20<sup>e</sup> siècle dans le bassin du Rhin peuvent également contribuer à cette évolution. On ne détecte aucune tendance particulière de 1961 à 2010 concernant les débits d'étiage. La perception actuelle des épisodes d'étiage est influencée d'une part par l'absence prolongée d'étiages significatifs et d'autre part par une plus grande vulnérabilité.

A partir d'une analyse détaillée de chroniques de débits, on a déterminé pour le Rhin des valeurs seuils rapportées à des débits à l'aide desquelles un épisode d'étiage peut être classifié en cinq niveaux d'intensité allant « d'étiage normal » à « étiage extrêmement rare ». Les chroniques de débit ont confirmé l'adéquation de cette classification, qui ordonne les épisodes d'étiage de manière différenciée, et ont permis sa validation. Les étiages extrêmes peuvent aisément être distingués des événements moins marquants mais la classification conserve une sensibilité suffisante pour les étiages de moindre intensité.

### **Répercussions futures possibles du changement climatique**

A la lumière des projections de débit disponibles pour la période 2021-2050, les débits d'étiage du Rhin oscillent sous l'effet du changement climatique dans une fourchette allant de baisses d'env. 10 % à des hausses d'env. 10 % également, sans laisser percevoir d'évolution nette. Dans un avenir plus lointain (2017-2100), les projections de débit font apparaître uniformément des baisses de débit d'étiage importantes pendant l'été hydrologique.

En partant d'un scénario pessimiste intégrant une baisse de 5 à 10 % du MNM7Q (débit d'étiage moyen pluriannuel sur 7 jours consécutifs) sur la période comprise entre 2021 et 2050, on obtient pour des périodes de retour croissantes des baisses plus importantes de l'ordre de 7 à 14 % maximum pour des débits d'étiage d'une récurrence de 2 à 50 ans. La baisse de débit est accompagnée d'une nette prolongation de la durée de l'étiage.

Des étiages estivaux pourraient gagner en importance sur le Rhin à l'avenir, en particulier en regard de leurs répercussions sur l'écologie. En effet, quand les débits sont bas, les températures de l'eau peuvent augmenter plus fortement en été. Les épisodes d'étiages estivaux de 2003 et 2006 peuvent être pris ici comme exemples de telles répercussions. Selon les analyses réalisées par le groupe d'experts STEMP de la CIPR, il faut compter avec une augmentation des températures estivales des eaux du Rhin de l'ordre de 1,5 degrés pour le futur proche et de plus de 3 degrés pour le futur éloigné. Il en résulte pour le futur proche et le futur éloigné, notamment en périodes de faibles débits, une augmentation des jours avec des températures de l'eau dépassant 25 degrés (valeur seuil critique sous l'angle écologique) sur le Rhin.

## Bibliographie

Arbeitskreis KLIWA (2009): Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Bericht 14

Arbeitskreis KLIWA (2017): Seite und Projekt über Niedrigwasser-Anpassung (*Bericht wird voraussichtlich Ende 2017 publiziert*). <http://www.kliwa.de/hydrologie-niedrigwasser-anpassung.htm>

Beijk, V. (2017): Focus on fresh water supply in the Dutch Rhine Delta. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_2\\_5\\_fresh\\_water\\_supply\\_in\\_the\\_dutch\\_delta\\_-\\_vincent\\_beijk\\_rws.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_5_fresh_water_supply_in_the_dutch_delta_-_vincent_beijk_rws.pdf)

Belz, J. (2005): Niedrigwasser-Abflüsse im Rheingebiet im 20. Jahrhundert – Veränderungen und Ursachen. – In: BfG-Veranstaltungen 5/2005 „Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung“, Koblenz 2005

Belz, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., Mendel, H. G., Meuser, A., Müller, G., Pfister, L. Plonka, B. und W. van Vuuren (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. KHR-Bericht Nr. I-22, ISBN 978-90-70980-33-7.

BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) (2016): Informationsplattform Undine (u.a. Seite „Extremereignisse Rhein: Hochwasser, Niedrigwasser“). <http://undine.bafg.de/>

BMVI (Hrsg.) (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI. Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.

<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/kliwas-abschlussbericht-des-bmvi-2015-03-12.pdf>

Buck, W.; K. Felkel; H. Gerhard; H. Kalweit; J. van Malde; K.-R. Nippes; B. Ploeger und W. Schmitz (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen - Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. KHR-Berichte I-11. ISBN 90-70980-17-7.

BY- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (Hrsg.) (2016): Niedrigwasser-Informationssdienst Bayern (NID). <https://www.nid.bayern.de/>

BY- LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (Hrsg.) (2016): Niedrigwasser in Bayern – Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen.

Cammalleri, C. (2017): Drought monitoring and assessment at EU level through a novel low-flow index. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_3\\_3\\_cammalleri\\_chr\\_sep2017.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_3_3_cammalleri_chr_sep2017.pdf)

CHR (1978) : « Le bassin du Rhin. Monographie hydrologique »

CHR (2017): Report/Summary of „Low flows in the Rhine catchment“ September 20-21, 2017 in Basel, Switzerland - Theme of the international-scientific symposium 'Science meets practice'. <http://www.chr-khr.org/en/event/low-flows-rhine-catchment> and [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/report\\_symposium\\_basel.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/report_symposium_basel.pdf) (summary)

CIPMS (2009-2013) : Projet transfrontalier « Gestion des crues et des étiages dans le bassin de la Moselle et de la Sarre – FLOW MS » (Flood = crue, LOW water = étiage, Moselle et Sarre). <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/60262/>

CIPMS (2014) : Rapport du GT IH des CIPMS sur l'état des lieux « Problématique des étiages ». <http://www.iksms-cipms.org/servlet/is/410/Rapport%20probl%C3%A9matique%20des%20%C3%A9tiages.pdf?command=downloadContent&filename=Rapport%20probl%C3%A9matique%20des%20%C3%A9tiages.pdf> (NB : un nouveau rapport est attendu pour 2018)

CIPR (2004) : Pressions thermiques sur les eaux pendant l'été 2003. Synthèse des rapports de situation nationaux. Rapport CIPR n° 142 <https://www.iksr.org/>

CIPR (2006) : Mesures relatives aux pressions thermiques sur le Rhin en période de canicule et de sécheresse. Aperçu et regroupement des rapports nationaux rapport CIPR n° 152 <https://www.iksr.org/>

CIPR (2011) : Etude de scénarios sur le régime hydrologique du Rhin. Rapport CIPR n° 188 <https://www.iksr.org/>

CIPR (2012) : Périodes d'étiage en 2011 dans le bassin du Rhin. Rapport CIPR n° 198 <https://www.iksr.org/>

CIPR (2013a) : Présentation de l'évolution des températures de l'eau du Rhin sur la base de températures mesurées et validées de 1978 à 2011. Rapport CIPR n° 209 <https://www.iksr.org/>

CIPR (2013b) : Etat des connaissances sur les éventuelles répercussions de modifications du régime hydrologique et de la température de l'eau sur l'écosystème du Rhin et actions envisageables. Rapport CIPR n° 204 <https://www.iksr.org/>

CIPR (2014) : Estimations des conséquences du changement climatique sur l'évolution future des températures de l'eau du Rhin sur la base de scénarios climatiques - Rapport succinct. Rapport CIPR n° 213, <https://www.iksr.org/>

CIPR (2015) : Stratégie d'adaptation au changement climatique dans le DHI Rhin. Rapport CIPR n° 219 <https://www.iksr.org/>

CIPR (2016 ; document interne) : Relevé des décisions du 17<sup>e</sup> échange d'expériences entre les centres de prévision des crues du Rhin (HWVZ(1)16-02-01)

CIPR (2017/2018) (interne) : Différents documents du GT H et du GE LW, inventaire des mesures nationales et des vulnérabilités, liste bibliographique etc.

CIPR (2017). Ecological aspects of low flow. Exposé en atelier CHR "Low flows in the Rhine catchment", Bâle 20/21 septembre 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_2\\_4\\_gangi\\_ecology.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_4_gangi_ecology.pdf)

Commission de l'UE (2007): Communication de la Commission – Faire face aux problèmes de rareté de la ressource en eau et de sécheresse dans l'Union européenne (COM/2007/0414). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A52007DC0414> ainsi que [http://ec.europa.eu/environment/water/adaptation/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/water/adaptation/index_en.htm)

Commission de l'UE (2008): Technical Report 023 - Drought management plan report including agricultural, drought indicators and climate change aspects (Water scarcity and droughts expert network) [http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/dmp\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/dmp_report.pdf)

Commission de l'UE (2009): Technical Report - 040 – Guidance document No. 24 Common Implementation Strategy (CIS) for the WFD (2000/60/EC) River basin management in a changing climate [https://circabc.europa.eu/sd/a/a88369ef-df4d-43b1-8c8c-306ac7c2d6e1/Guidance%20document%20n%2024%20-%20River%20Basin%20Management%20in%20a%20Changing%20Climate\\_FINAL.pdf](https://circabc.europa.eu/sd/a/a88369ef-df4d-43b1-8c8c-306ac7c2d6e1/Guidance%20document%20n%2024%20-%20River%20Basin%20Management%20in%20a%20Changing%20Climate_FINAL.pdf)

Commission de l'UE (2012): Strategy for Water Scarcity and Droughts (policy review part of the "Blueprint to safeguard European waters"). [http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm)

et

Communication de la Commission – Rapport concernant le réexamen de la politique européenne relative à la rareté de la ressource en eau et à la sécheresse (COM/2012/0672 final). <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52012DC0672&from=EN>

DROUGHT-R&SPI (2015): Fostering European Drought Research and Science-Policy Interfacing. <http://www.eu-drought.org/>

DVWK (1983): Niedrigwasseranalyse, Teil I: Statistische Untersuchung des Niedrigwasser-Abflusses. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. – Regeln zur Wasserwirtschaft, 120.

DVWK (1992): Niedrigwasseranalyse, Teil II: Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflussdefizits. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. – Regeln zur Wasserwirtschaft, 121.

EEA (2009): Water resources across Europe – confronting water scarcity and drought. <https://www.eea.europa.eu/publications/water-resources-across-europe>

Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, de Keizer, O., M., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. und D. Volken (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the River Rhine Basin. Results of the RheinBlick2050 project. KHR-Bericht Nr. I-23, ISBN 978-90-70980-35-1.

HYDRON (2015): Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM Daten Version 4.8 run 2 und 3 für das Rhein-Einzugsgebiet vom Pegel Worms bis zum Pegel Köln. Bericht (unveröff.) im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz und dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie.

HYDRON (2017): Auswertungen zur zukünftigen Veränderung der Niedrigwassersituation in Rheinland-Pfalz. Bericht (unveröff.) im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Rheinland-Pfalz.

IKSE (2017): „Hydrologische Auswertung der Niedrigwassersituation 2015 im Einzugsgebiet der Elbe“. [http://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user\\_upload/D/06\\_Publikationen/07\\_Verschiedenes/2017\\_IKS\\_E-NW-2015.pdf](http://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user_upload/D/06_Publikationen/07_Verschiedenes/2017_IKS_E-NW-2015.pdf)

Ionita Scholz, M. (2017) Monthly and seasonal predictions of Rhine low flows and water levels based on hydrologic, atmospheric and oceanic data. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_1\\_5\\_ionita-chr\\_basel.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_5_ionita-chr_basel.pdf)

JRC (2017): European Drought Observatory – EDO. <http://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000>

Kohn, I. (2017): European Drought Impact Inventory (EDII) (EU Database). Exposé en atelier CHR „Low flows in the Rhine catchment“, Bâle 20/21 septembre 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_2\\_6\\_edii\\_ikohn\\_chr.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_6_edii_ikohn_chr.pdf) und <http://www.eu-drought.org/>

LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement - Material – Stand 5. Februar 2007

MVW (Ministerie van Verkeer en Waterstaat) (2009a): Waterwet. Pays-Bas, 29 janvier 2009. <http://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/2018-01-01>

MVW (Ministerie van Verkeer en Waterstaat) (2009b): Waterbesluit. Pays-Bas, 30 novembre 2009. <http://wetten.overheid.nl/BWBR0026872/2017-01-01>

Puygrenier, D. und Antheaume, M. (2017): Impacts of low flows on the (water) energy sector. Exposé en atelier CHR „Low flows in the Rhine catchment“, Bâle 20/21 septembre 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_2\\_7\\_edf\\_chr\\_20170921\\_v3.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_2_7_edf_chr_20170921_v3.pdf)

Regierung von Unterfranken (2012): „Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie“ (AMÖ). [https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/6/3/2012\\_12\\_04\\_alarmplan\\_main.pdf](https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/6/3/2012_12_04_alarmplan_main.pdf)

Stahl, K., Weiler, M., Kohn, I., Freudiger, D., Seibert, J., Vis, K., Gerlinger, K. und M. Böhm (2016): Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels – Synthesebericht. KHR-Bericht I-25 (Projektleitung J. Belz), ISBN 978-90-70980-37-5.

StMUV (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit) (2011): Wasserbericht Bayern

UN (2013): Capacity Development to support national drought management policies. <http://www.droughtmanagement.info/idmp-activities/capacity-development-to-support-national-drought-management-policies/>

UN-ECE (2017): „International Workshop on Water Scarcity: Taking action in transboundary basins and reducing health impacts“. <https://www.unece.org/index.php?id=43633> et <https://www.unece.org/info/media/news/environment/2018/water-scarcity-taking-action-in-transboundary-basins-and-addressing-health-impacts/doc.html>

Wahliß, W. (2017): Instruments for low flow management in Bavaria based on LAWA-guidance. Präsentation KHR-Workshop „Low flows in the Rhine catchment“, Basel 20./21. September 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_3\\_2\\_Wahliß\\_lfm\\_in\\_bavaria.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_3_2_Wahliß_lfm_in_bavaria.pdf)

Weingartner, R. (2017): Low water in Switzerland. Exposé en atelier CHR „Low flows in the Rhine catchment“, Bâle 20/21 septembre 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_1\\_4\\_weingartner\\_low\\_flow\\_basel\\_wg\\_final.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_4_weingartner_low_flow_basel_wg_final.pdf)

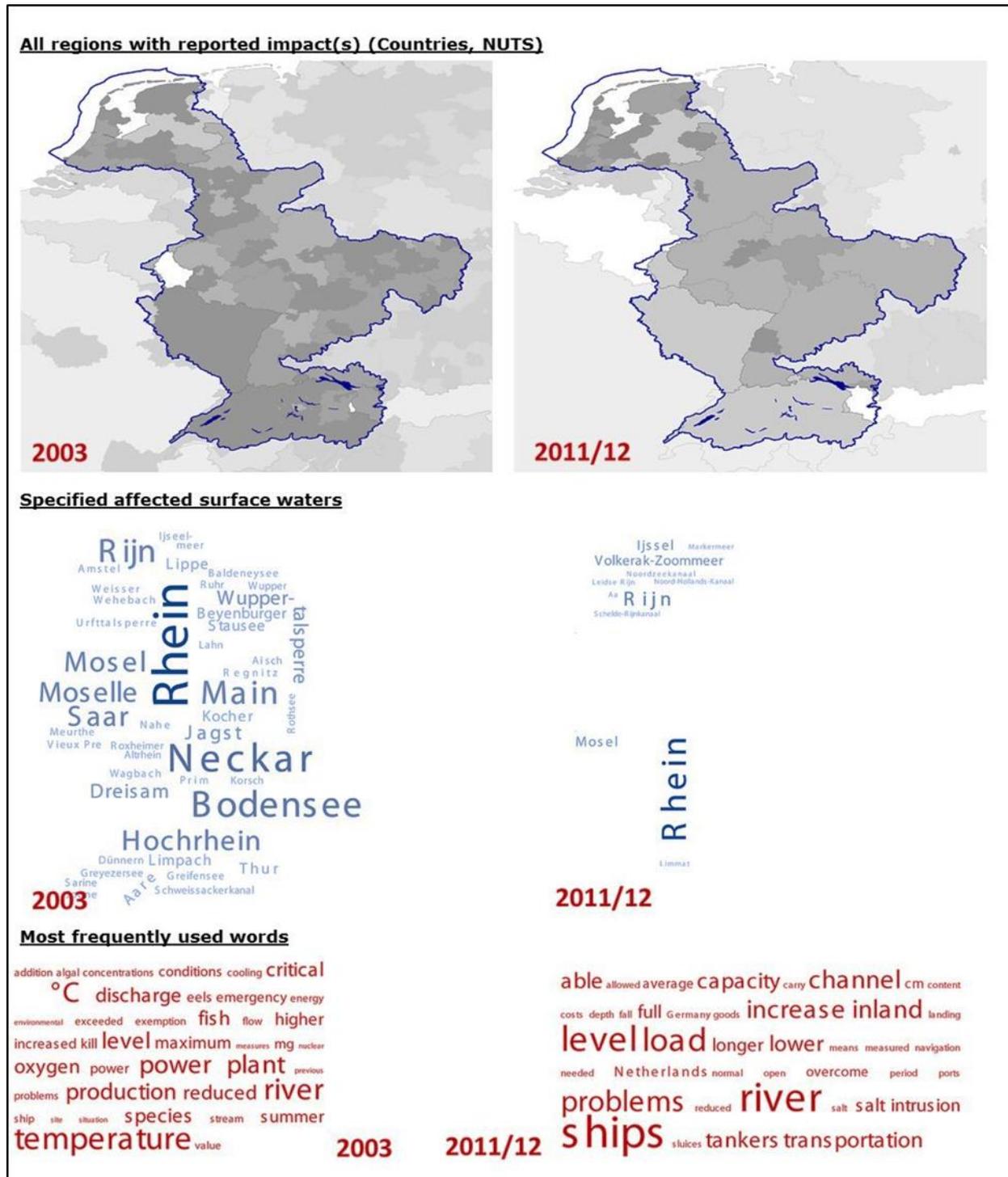
WMO (2009): Manual on Low-flow Estimation and Prediction - Operational Hydrology Report No. 50. WMO-No. 1029. [http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/low-flow\\_estimation\\_prediction/WMO%201029%20en.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/low-flow_estimation_prediction/WMO%201029%20en.pdf)

WMO and GWP (2014): Integrated Drought Management Programme (IDMP). <http://www.wmo.int/gfcs/idmp> und <http://www.droughtmanagement.info/find/library/>

Zappa, M. et al. (2017): Some current challenges in setting up and operating sub-seasonal to seasonal predictions of low flows in Switzerland. Exposé en atelier CHR „Low flows in the Rhine catchment“, Bâle 20/21 septembre 2017. [http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session\\_1\\_2\\_zappa\\_khr\\_2017\\_basel\\_wsl.pdf](http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chreventdocuments/session_1_2_zappa_khr_2017_basel_wsl.pdf)

## **Annexes**

**Annexe 1 : comparaison des impacts des épisodes d'étiage de 2003 et de 2011 sur la base de l'European Drought Impact Inventory (EDII) (Kohn, 2017)**

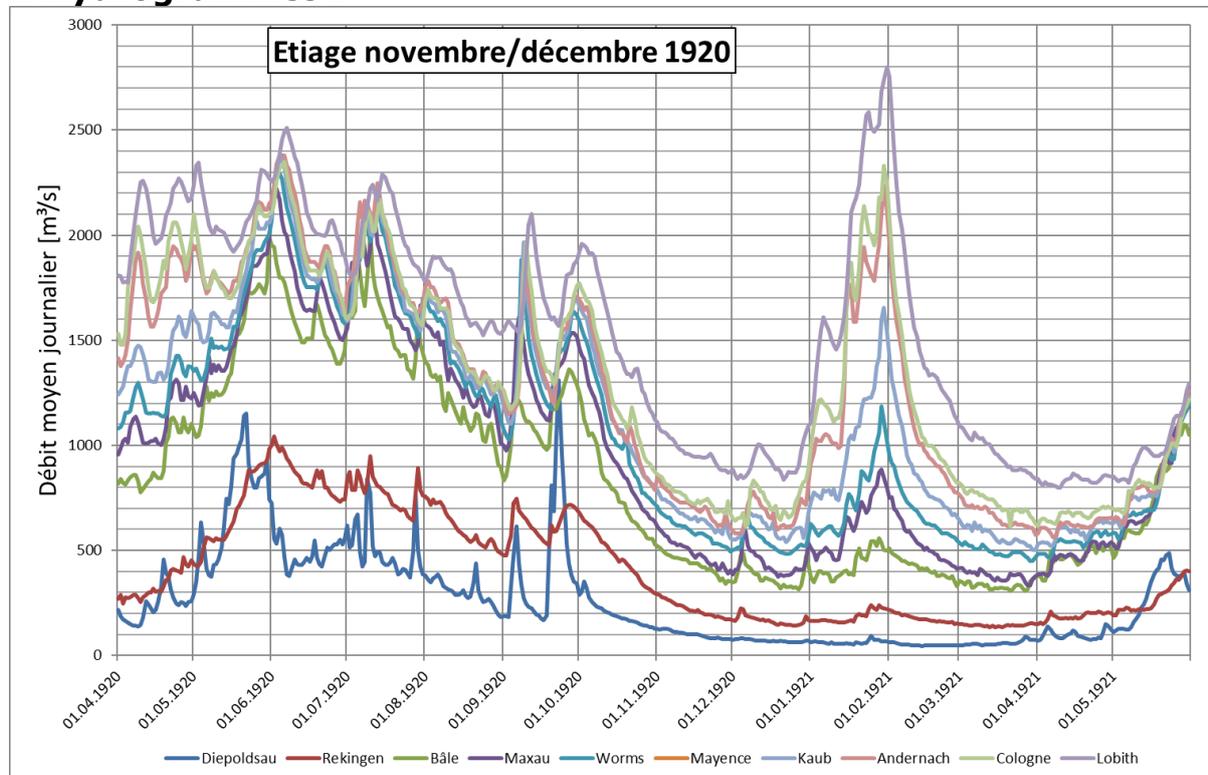


## Annexe 2 : Description des épisodes d'étiage sélectionnés

**Remarque :** Outre pour l'événement 2003 qui a été décrit en détail dans le chapitre 7.5, la CIPR dispose d'informations détaillées sur les évolutions météorologiques et hydrologiques ainsi que sur les impacts des événements respectifs en Suisse.

### Episode d'étiage : novembre/décembre 1920

#### 1 Hydrogrammes :



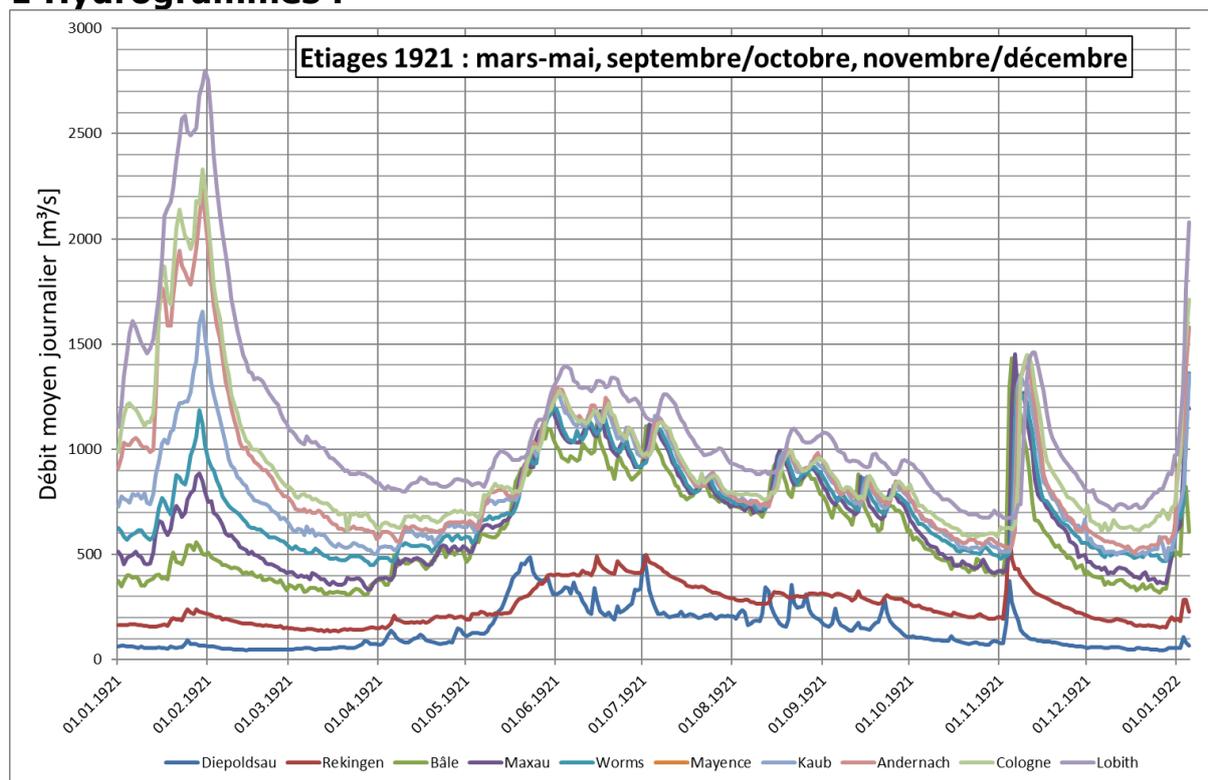
#### 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Nov./déc. 1920	Période de retour Nov./déc. 1920	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Nov./déc. 1920	Période de retour Nov./déc. 1920
Diepoldsau	92,2	64	15 - 20	4	42	> 50
Rekingen	238	145	50	7	75	> 50
Bâle	527	326	100	5	85	> 50
Maxau	645	382	50	5	76	> 50
Worms	720	489	20	5	75	> 50
Mayence	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	559	20	6	79	50
Andernach	998	596	50	6	72	50
Cologne	1028	645	50	6	69	40
Lobith	1095	858	15	6	60	15

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episodes d'étiage 1921 : mars-mai, sept./oct. et nov./déc.

## 1 Hydrogrammes :



## 2 Paramètres :

### Episode de mars - mai 1921

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Mars - mai 1921	Période de retour Mars - mai 1921	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Mars - mai 1921	Période de retour Mars - mai 1921
Diepoldsau	92,2	49	100	4	67	> 50
Rekingen	238	138	100	7	108	> 50
Bâle	527	318	100	5	95	> 100
Maxau	645	359	60	5	96	> 100
Worms	720	468	30	5	99	> 50
Mayence	850	-		6	-	
Kaub	851	523	50	6	96	> 50
Andernach	998	589	50	6	<b>97</b>	> 100
Cologne	1028	637	50	6	100	> 100
Lobith	1095	809	15	6	85	> 50

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

**Episode de septembre/octobre 1921**

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sept./oct. 1921	Période de retour Sept./oct. 1921	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Sept./oct. 1921	Période de retour Sept./oct. 1921
Diepoldsau	92,2	75	5	4	17	20
Rekingen	238	199	5	7	25	2-5
Bâle	527	414	5-10	5	27	5-10
Maxau	645	420	20	5	33	10
Worms	720	494	20	5	36	10
Mayence	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	523	50	6	51	20
Andernach	998	544	100	6	78 *	50 *
Cologne	1028	590	100	6	119	> 100
Lobith	1095	682	75	6	79 *	> 50 *

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

\*Période d'étiage interrompue par une journée avec Q > valeur seuil ; sinon, la période de retour aurait été > 100

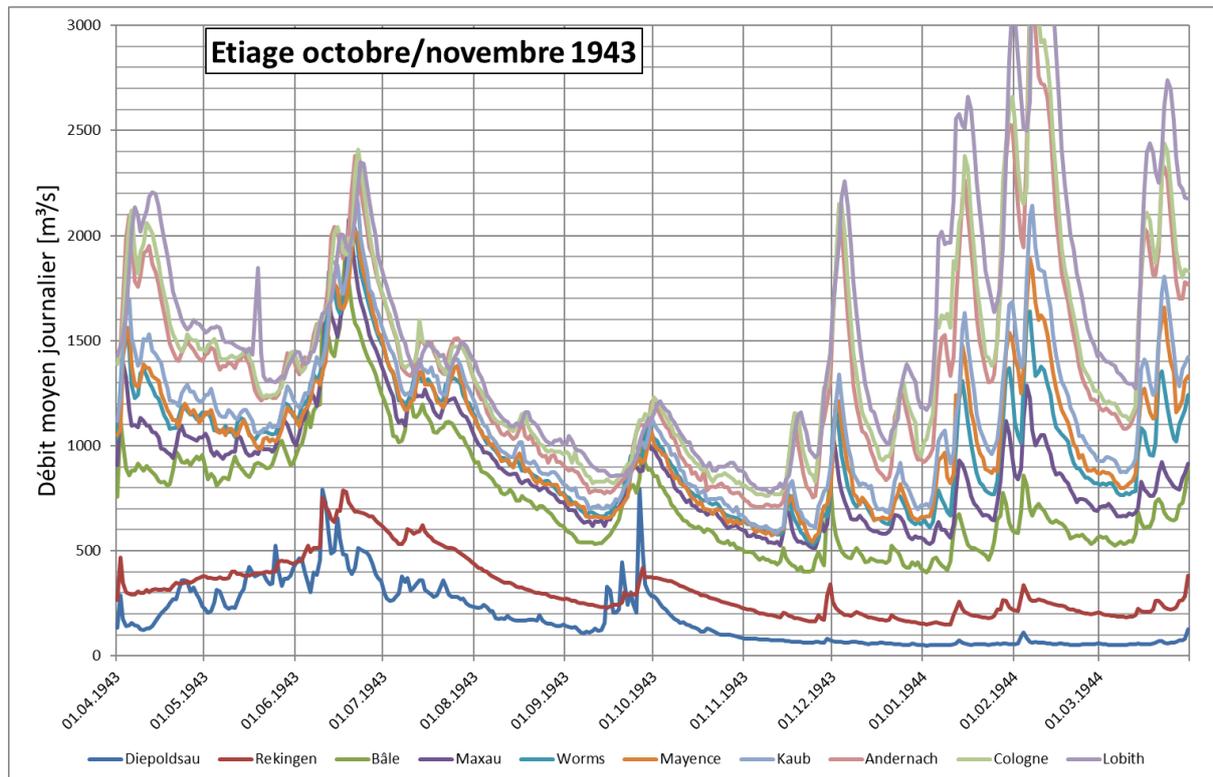
**Episode de novembre/décembre 1921**

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Nov./déc. 1921	Période de retour Nov./déc. 1921	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Nov./déc. 1921	Période de retour Nov./déc. 1921
Diepoldsau	92,2	48	100	4	50	> 100
Rekingen	238	157	20	7	38	5-10
Bâle	527	336	50	5	42	15
Maxau	645	371	50	5	43	15
Worms	720	483	50	5	45	15
Mayence	850	-	-	6	-	-
Kaub	851	509	70	6	48	15
Andernach	998	527	> 100	6	49	15
Cologne	1028	623	60	6	49	15
Lobith	1095	729	30	6	45	10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : octobre/novembre 1943

## 1 Hydrogrammes :



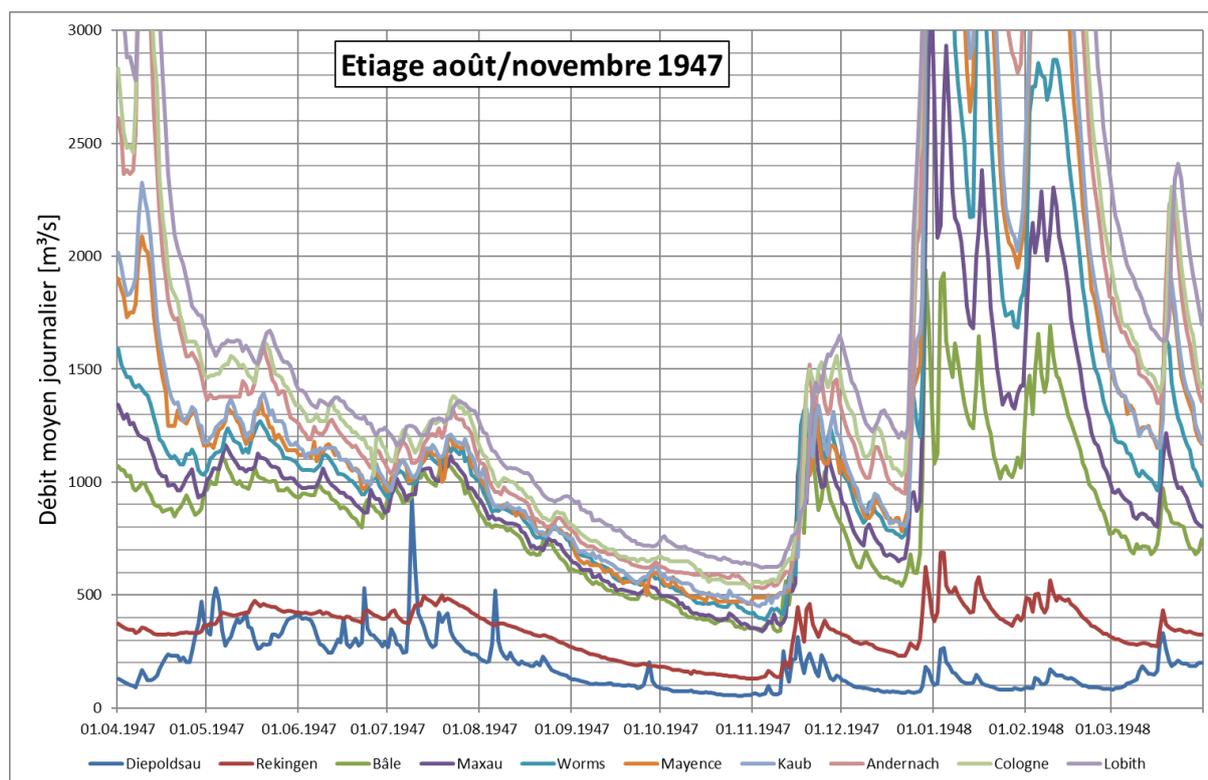
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961-2010	NM7Q oct./nov. 1943	Période de retour oct./nov. 1943	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q oct./nov. 1943	Période de retour oct./nov. 1943
Diepoldsau	92,2	64	20	4	32	> 100
Rekingen	238	170	15	7	29	5
Bâle	527	410	15	5	38	10
Maxau	645	530	5	5	21	5
Worms	720	556	5-10	5	23	5
Mayence	850	586	20	6	52	20
Kaub	851	601	20	6	49	20
Andernach	998	712	15	6	39	10
Cologne	1028	769	10	6	37	10
Lobith	1095	791	15	6	41	5-10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : août - novembre 1947

## 1 Hydrogrammes :



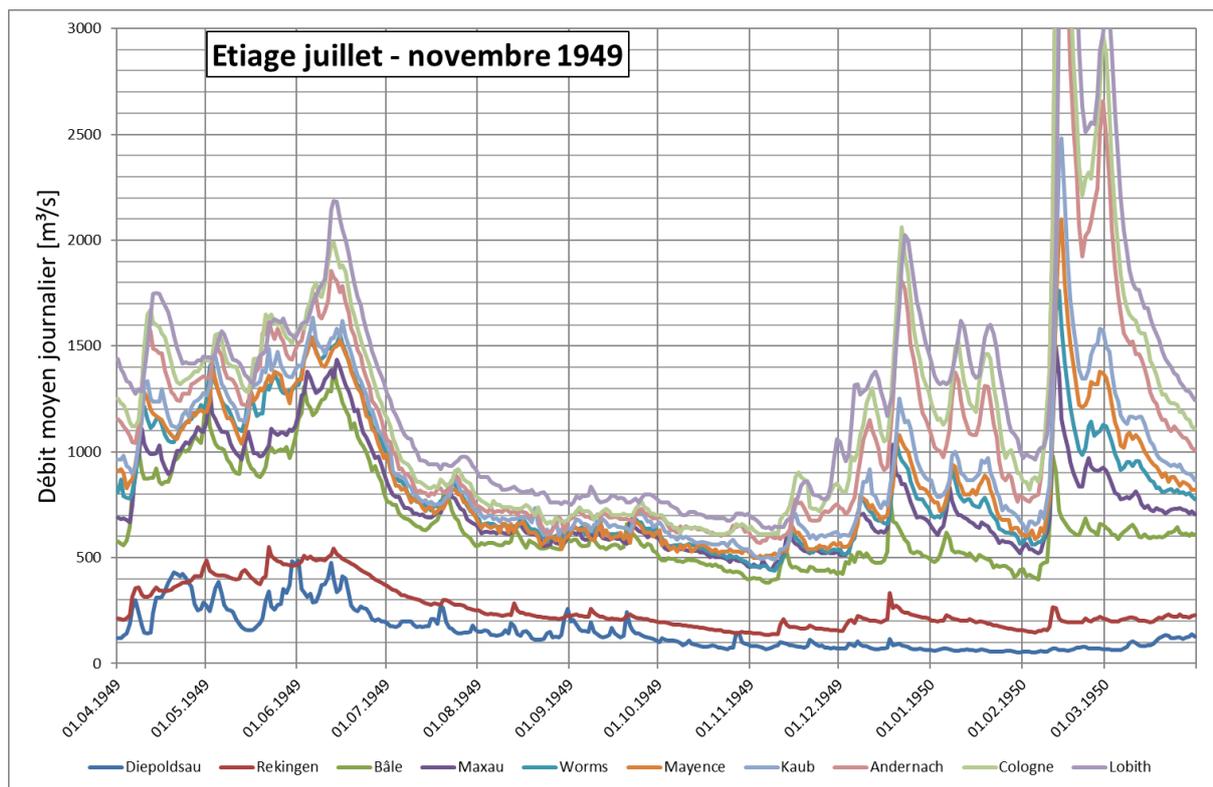
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q 1947	Période de retour 1947	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q 1961-2010	Période de retour 1947
Diepoldsau	92,2	55	50	4	41	> 100
Rekingen	238	131	100	7	68	20
Bâle	527	351	40	5	60	55
Maxau	645	353	70	5	75	70
Worms	720	407	70	5	75	>50
Mayence	850	467	> 100	6	93	>50
Kaub	851	460	> 100	6	92	>>50
Andernach	998	536	> 100	6	105	> 100
Cologne	1028	546	> 100	6	104	> 100
Lobith	1095	624	> 100	6	104	>>50

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : Juillet - novembre 1949

## 1 Hydrogrammes :



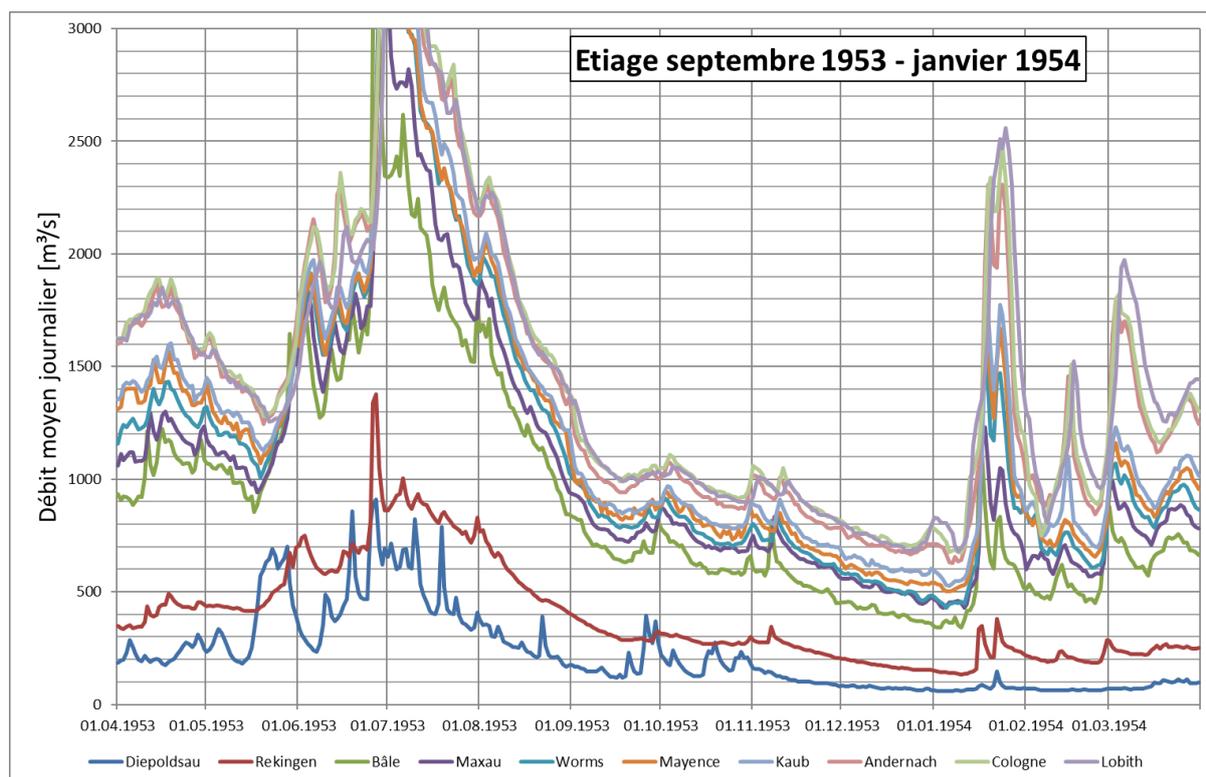
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7 Q 1961- 2010	NM7Q Juillet- nov. 1949	Période de retour Juillet-nov. 1949	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q juillet-nov. 1949	Période de retour Juillet- nov. 1949
Diepoldsau	92,2	72	5-10	4	14	10
Rekingen	238	138	100	7	99	>50
Bâle	527	392	10	5	44	20
Maxau	645	460	10	5	75	>50
Worms	720	452	35	5	131	>>50
Mayence	850	506	75	6	169	>>50
Kaub	851	497	> 100	6	<b>137</b>	>>50
Andernach	998	587	> 100	6	158	> 100
Cologne	1028	611	70	6	156	> 100
Lobith	1095	644	> 100	6	151	>>50

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : de septembre 1953 à janvier 1954

## 1 Hydrogrammes :



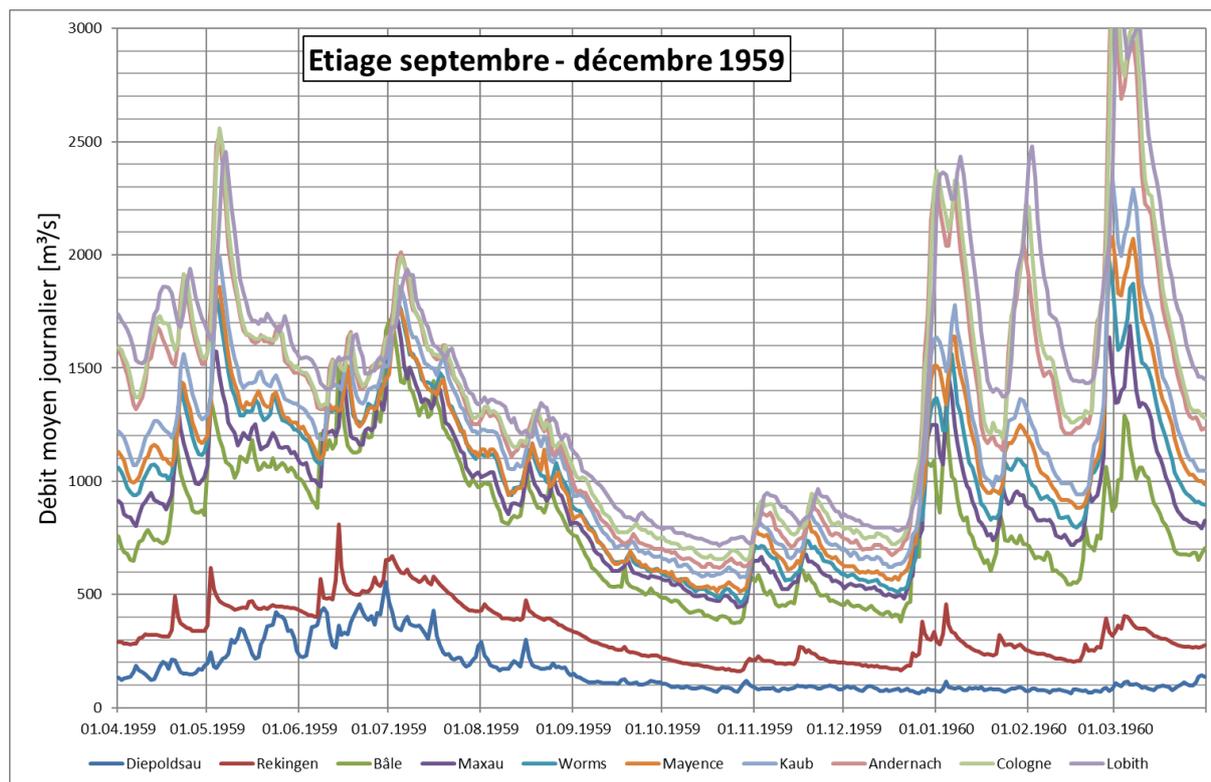
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sept. 1953 - janv. 1954	Période de retour Sept. 1953 - janv. 1954	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Sept. 1953 - janv. 1954	Période de retour Sept. 1953 - janv. 1954
Diepoldsau	92,2	60	25	4	50	> 100
Rekingen	238	<b>137</b>	100	7	56	10-20
Bâle	527	354	35	5	59	>50
Maxau	645	446	15	5	60	50
Worms	720	447	40	5	63	40
Mayence	850	511	70	6	67	35
Kaub	851	542	40	6	66	35
Andernach	998	650	30	6	66	40
Cologne	1028	689	30	6	63	40
Lobith	1095	690	60	6	126	>>50

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : septembre - décembre 1959

## 1 Hydrogrammes :



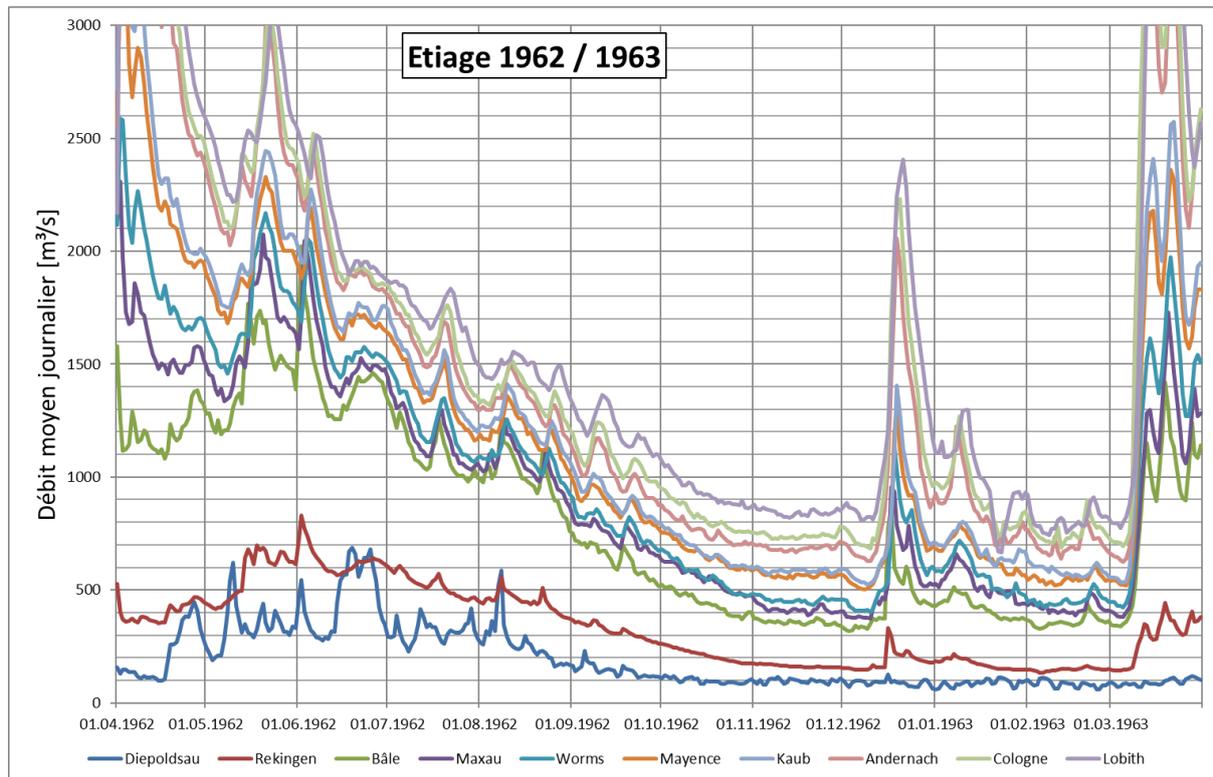
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sept. - déc. 1959	Période de retour Sept. - déc. 1959	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Sept. - déc. 1959	Période de retour Sept. - déc. 1959
Diepoldsau	92,2	72	10	4	43	> 100
Rekingen	238	165	20	7	54	10-20
Bâle	527	386	20	5	32	5-10
Maxau	645	462	15	5	42	15
Worms	720	492	20	5	68	50
Mayence	850	529	55	6	113	>>50
Kaub	851	586	20	6	72	50
Andernach	998	625	40	6	115	> 100
Cologne	1028	661	35	6	114	> 100
Lobith	1095	726	35	6	115	>>50

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : octobre - décembre 1962

## 1 Hydrogrammes :



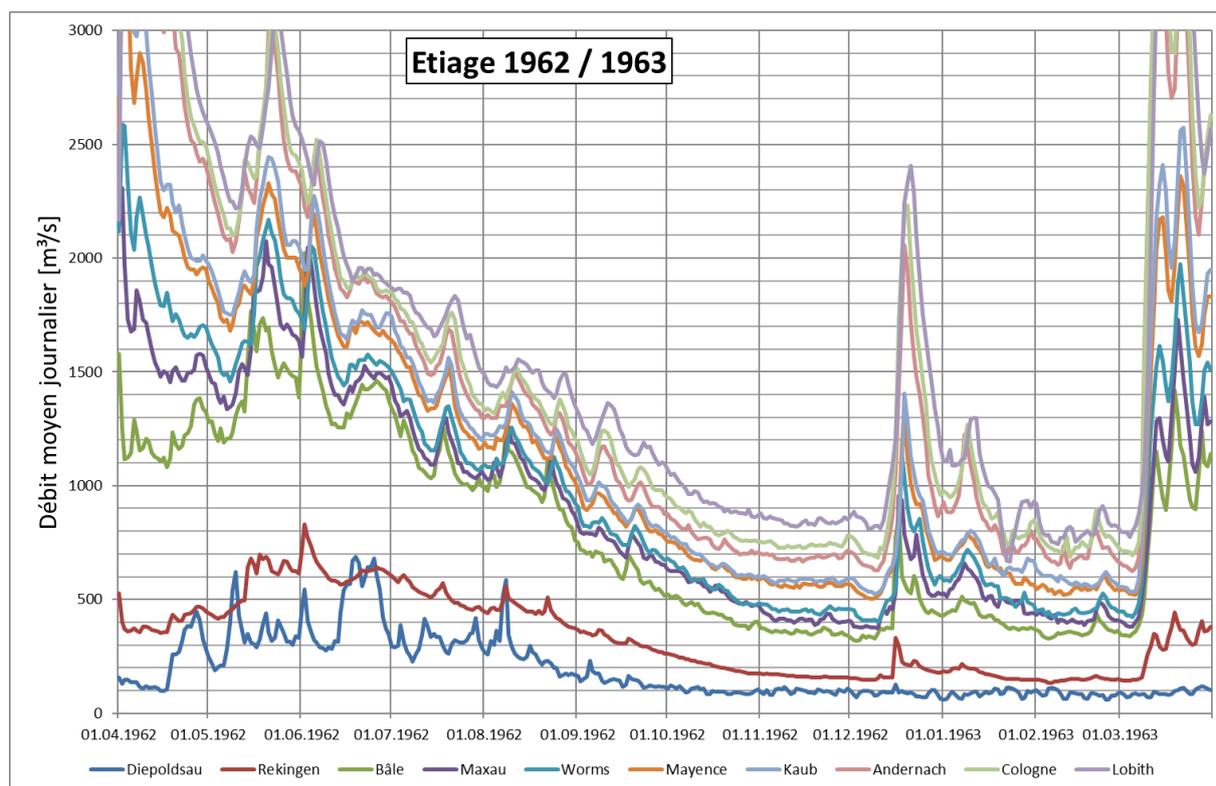
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Oct. - déc. 1962	Période de retour Oct. - déc. 1962	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Oct. - déc. 1962	Période de retour Oct. - déc. 1962
Diepoldsau	92,2	88	2-5	4	8	2-5
Rekingen	238	148	50	7	82	50
Bâle	527	330	65	5	77	75
Maxau	645	378	50	5	77	75
Worms	720	408	70	5	84	>50
Mayence	850	512	70	6	85	>50
Kaub	851	535	50	6	85	>50
Andernach	998	642	30	6	84	50
Cologne	1028	702	20	6	82	40
Lobith	1095	824	10-15	6	76	40

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage de janvier à mars 1963

## 1 Hydrogrammes :



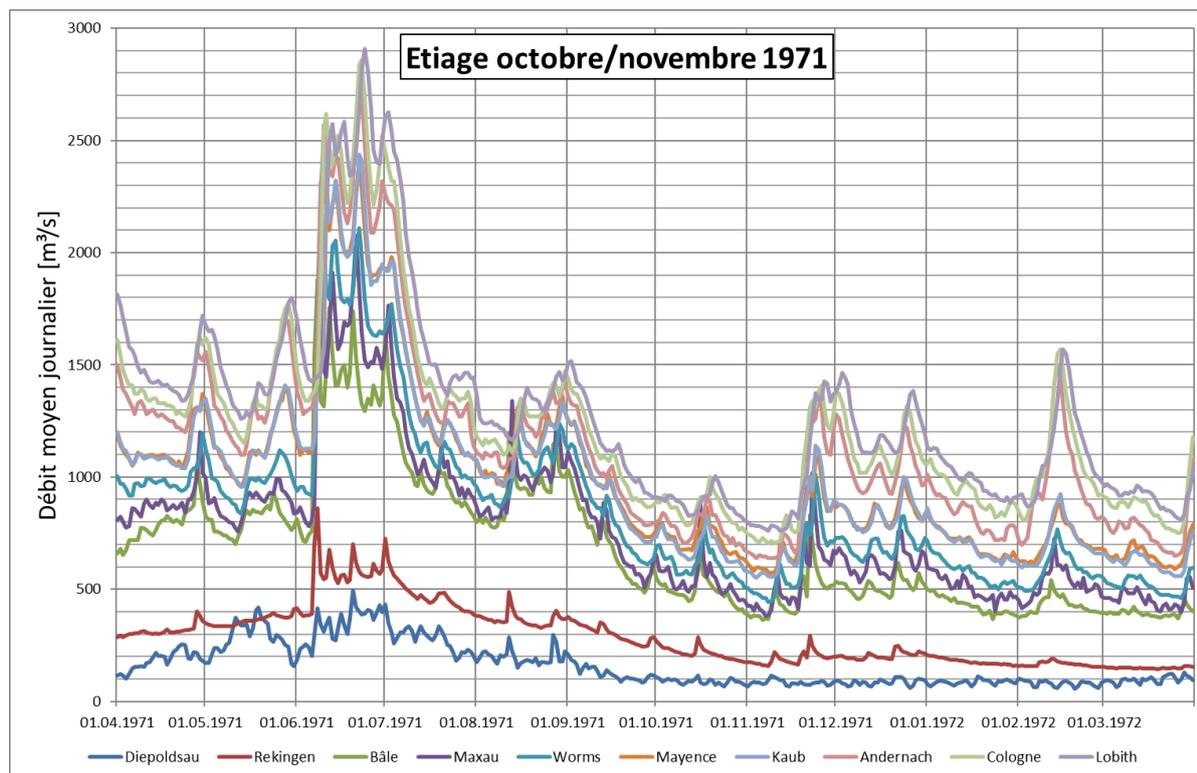
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Janv. - mars 1963	Période de retour Janv. - mars 1963	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Janv. - mars 1963	Période de retour Janv. - mars 1963
Diepoldsau	92,2	73	5-10	4	38	> 100
Rekingen	238	139	65	7	68	20
Bâle	527	338	55	5	68	>50
Maxau	645	394	35	5	60	50
Worms	720	434	50	5	73	>50
Mayence	850	530	50	6	74	40
Kaub	851	547	40	6	72	50
Andernach	998	645	30	6	56	30
Cologne	1028	712	20	6	55	20
Lobith	1095	765	20	6	55	15

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : octobre/novembre 1971

## 1 Hydrogrammes :



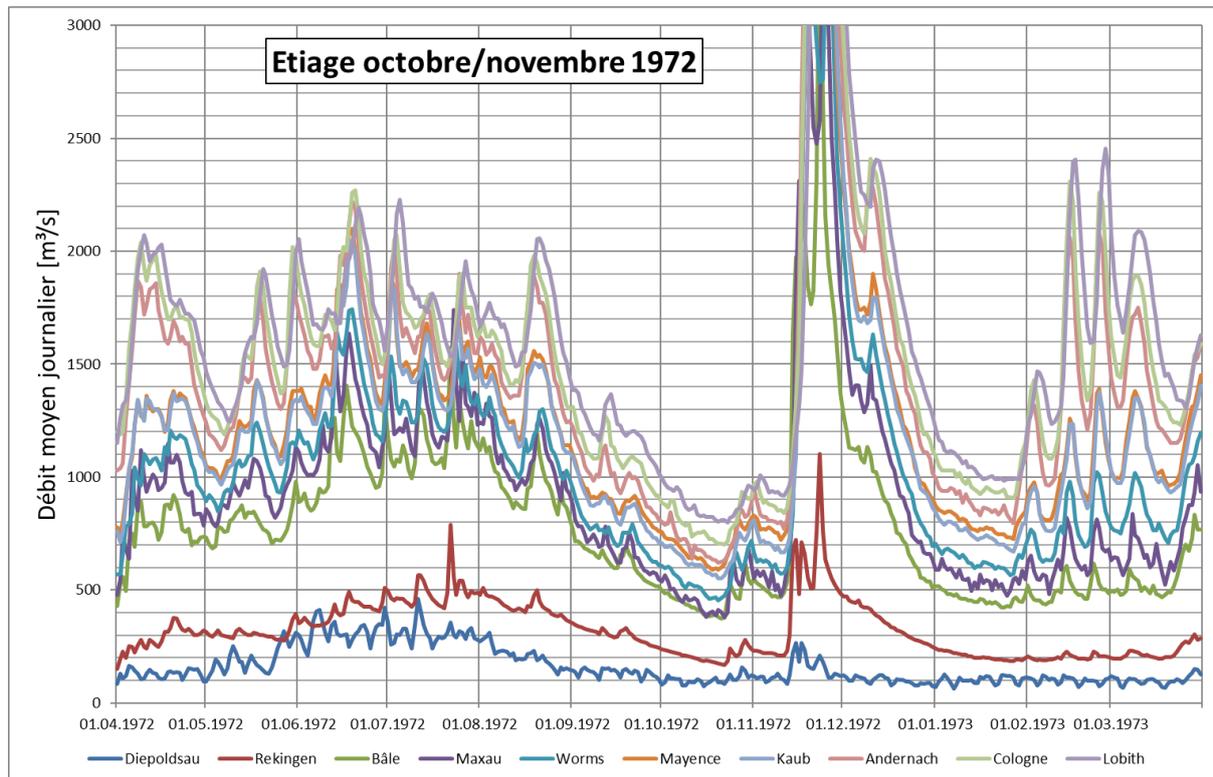
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Oct./nov. 1971	Période de retour Oct./nov. 1971	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Oct./nov. 1971	Période de retour Oct./nov. 1971
Diepoldsau	92,2	77	5	4	17	20
Rekingen	238	166	20	7	57	10-20
Bâle	527	374	20	5	33	10
Maxau	645	404	30	5	52	30
Worms	720	462	30	5	34	10
Mayence	850	585	25	6	33	5-10
Kaub	851	562	35	6	62	30
Andernach	998	643	30	6	64	35
Cologne	1028	713	20	6	62	35
Lobith	1095	771	20	6	63	15

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : octobre/novembre 1972

## 1 Hydrogrammes :



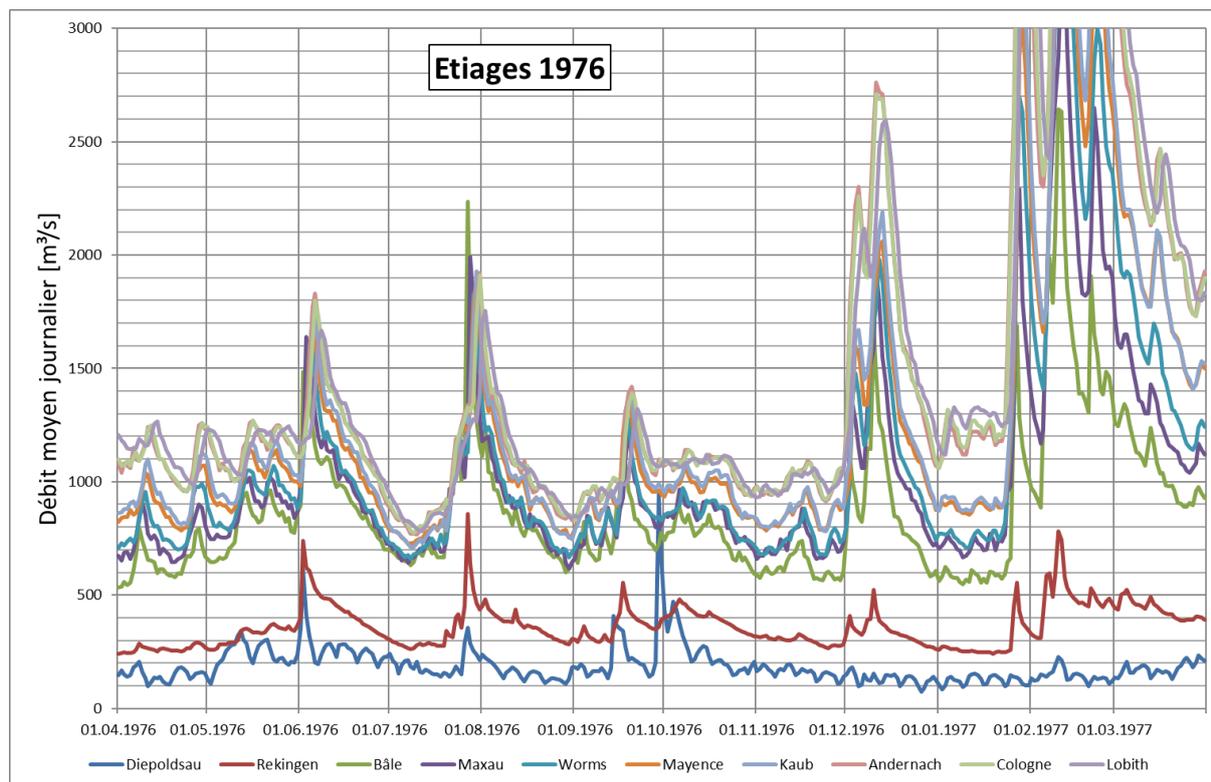
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Oct./nov. 1972	Période de retour Oct./nov. 1972	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Oct./nov. 1972	Période de retour Oct./nov. 1972
Diepoldsau	92,2	90	2	4	3	2
Rekingen	238	178	10	7	27	5
Bâle	527	384	10	5	44	15
Maxau	645	395	35	5	37	15
Worms	720	467	30	5	38	15
Mayence	850	585	25	6	50	15
Kaub	851	565	30	6	51	15
Andernach	998	634	35	6	52	20
Cologne	1028	712	20	6	50	20
Lobith	1095	810	15	6	49	10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episodes d'étiage : juillet 1976, août/septembre 1976 et octobre/novembre 1976

## 1 Hydrogrammes :



## 2 Paramètres :

### Episode de juillet 1976

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Juillet 1976	Période de retour Juillet 1976	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Juillet 1976	Période de retour Juillet 1976
Diepoldsau	92,2	149	<2	4	0	-
Rekingen	238	272	<2	7	0	-
Bâle	527	656	<2	5	0	-
Maxau	645	665	<2	5	0	-
Worms	720	678	2-5	5	11	2-5
Mayence	850	739	2-5	6	22	5
Kaub	851	729	2-5	6	20	5
Andernach	998	782	5-10	6	23	5
Cologne	1028	796	5-10	6	25	5
Lobith	1095	802	15	6	29	5

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

**Episode d'août/septembre 1976**

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Août/sept. 1976	Période de retour Août/sept. 1976	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	maxD < MNM7Q Août/sept 1976	Période de retour Août/sept. 1976
Diepoldsau	92,2	125	<2	4	0	-
Rekingen	238	295	<2	7	0	-
Bâle	527	638	<2	5	0	-
Maxau	645	663	<2	5	2	<2
Worms	720	694	<2	5	8	2-5
Mayence	850	778	2-5	6	10	2-5
Kaub	851	770	2-5	6	10	2-5
Andernach	998	843	2-5	6	27	5
Cologne	1028	851	2-5	6	32	5-10
Lobith	1095	853	5-10	6	38	5-10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

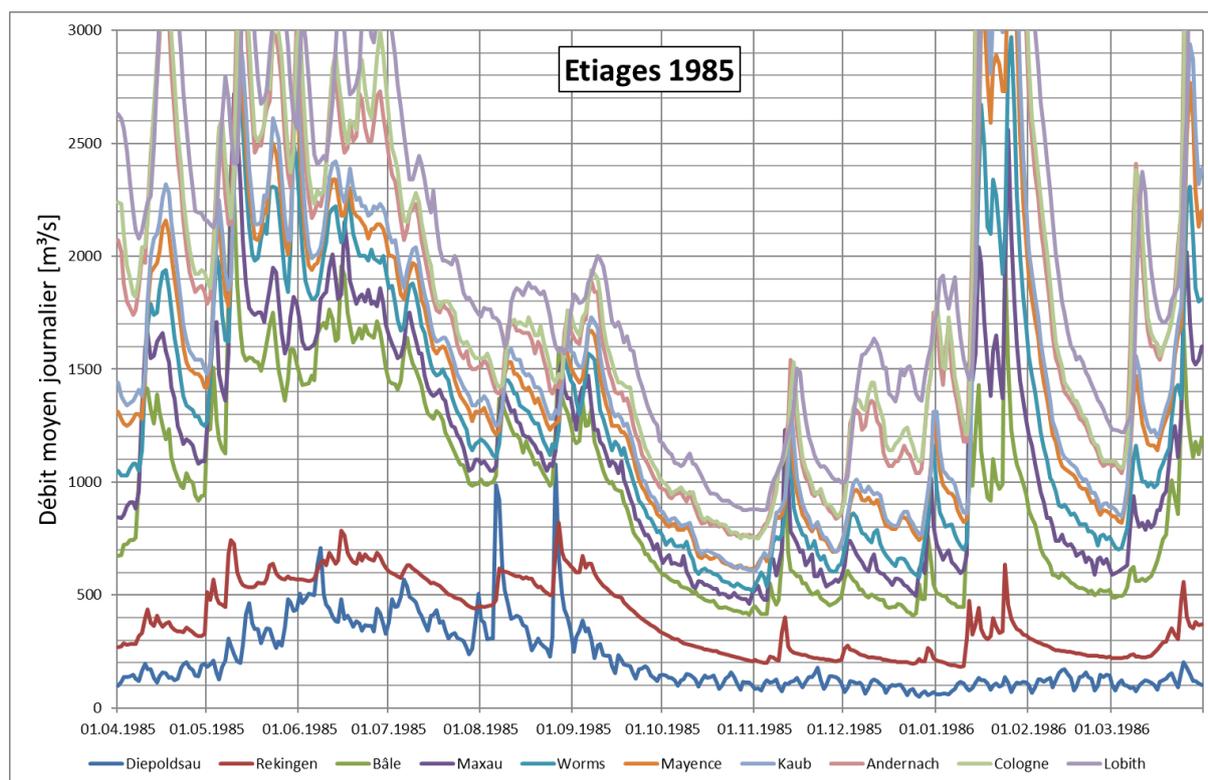
**Episode d'octobre/novembre 1976**

	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Oct./nov. 1976	Période de retour Oct./nov. 1976	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Oct./nov. 1976	Période de retour Oct./nov. 1976
Diepoldsau	92,2	<b>137</b>	<2	4	0	-
Rekingen	238	274	<2	7	0	-
Bâle	527	581	<2	5	0	-
Maxau	645	681	<2	5	0	-
Worms	720	694	2-5	5	9	2-5
Mayence	850	802	2-5	6	15	2-5
Kaub	851	809	2-5	6	15	2-5
Andernach	998	949	2-5	6	16	2-5
Cologne	1028	955	2-5	6	18	2-5
Lobith	1095	955	2-5	6	38	5-10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : octobre/novembre 1985

## 1 Hydrogrammes :



## 2 Paramètres :

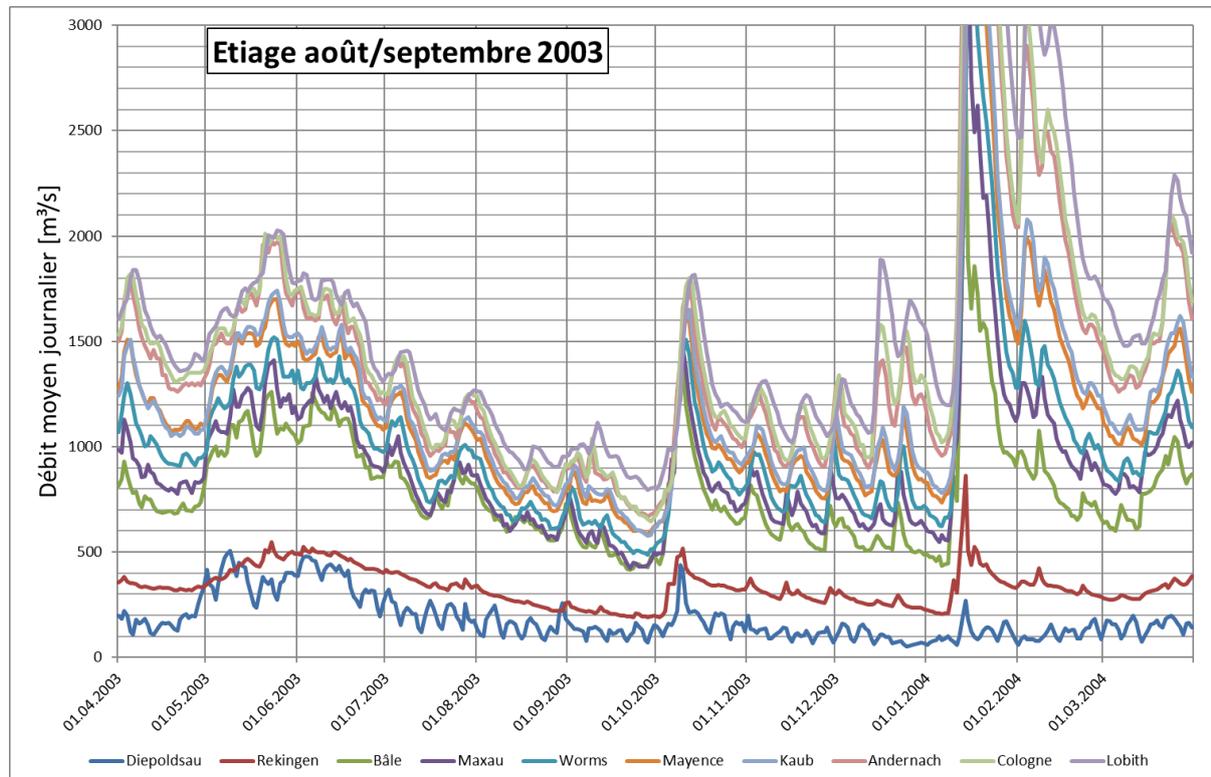
	Débit d'étiage [m <sup>3</sup> /s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Oct./nov. 1985	Période de retour Oct./nov. 1985	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Oct./nov. 1985	Période de retour Oct./nov. 1985
Diepoldsau	92,2	96	<2	4	3	2
Rekingen	238	206	5	7	19	2-5
Bâle	527	425	5	5	27	5-10
Maxau	645	486	10	5	29	5-10
Worms	720	534	10	5	28	5-10
Mayence	850	620	15	6	39	10
Kaub	851	616	15	6	37	10
Andernach	998	763	10	6	39	10
Cologne	1028	756	10	6	40	10
Lobith	1095	877	5-10	6	31	5-10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

## Episode d'étiage : août/septembre 2003

(voir chap. 7.5 pour une description détaillée de l'épisode)

### 1 Hydrogrammes :



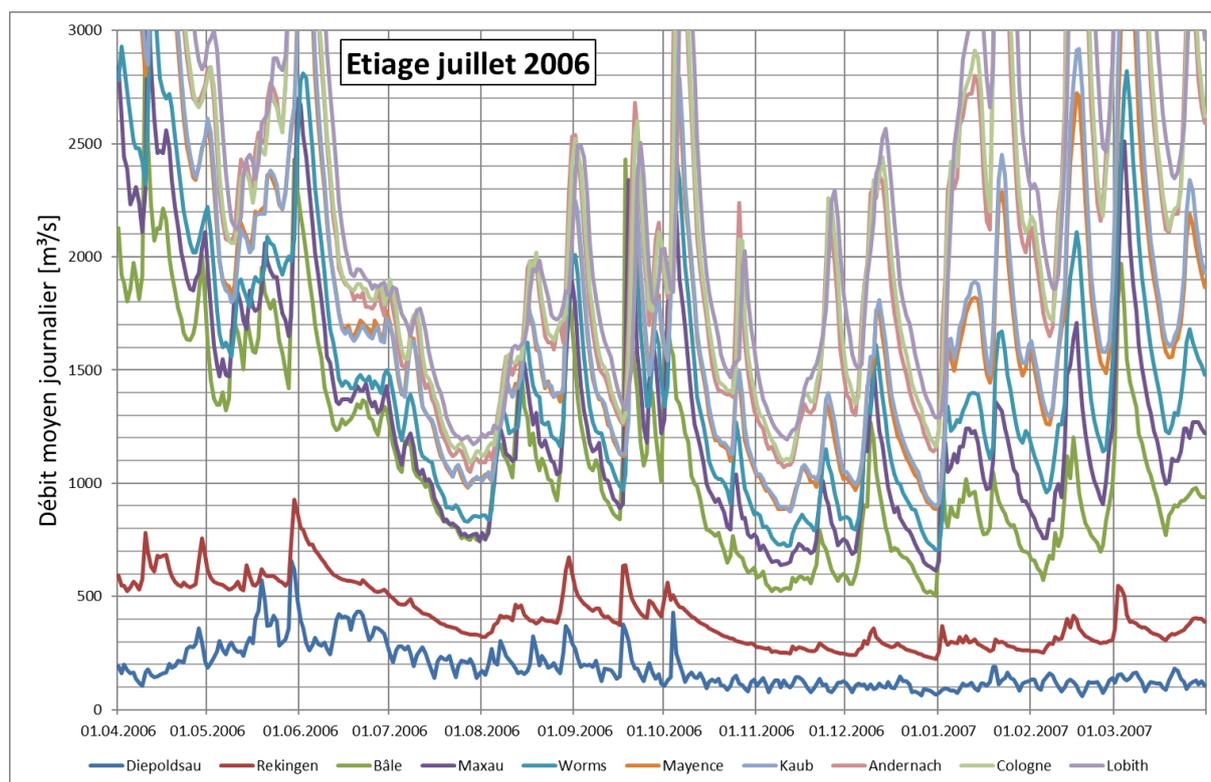
### 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Sept. 2003	Période de retour Sept. 2003	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Sept. 2003	Période de retour Sept. 2003
Diepoldsau	92,2	108	< 2	4	2	< 2
Rekingen	238	193	5	7	22	2-5
Bâle	527	431	5	5	20	5
Maxau	645	435	20	5	31	5-10
Worms	720	500	15	5	31	5-10
Mayence	850	596	20	6	33	5-10
Kaub	851	595	20	6	32	5-10
Andernach	998	682	20	6	62	30
Cologne	1028	666	35	6	33	5-10
Lobith	1095	808	15	6	34	5-10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : juillet/août 2006

## 1 Hydrogrammes :



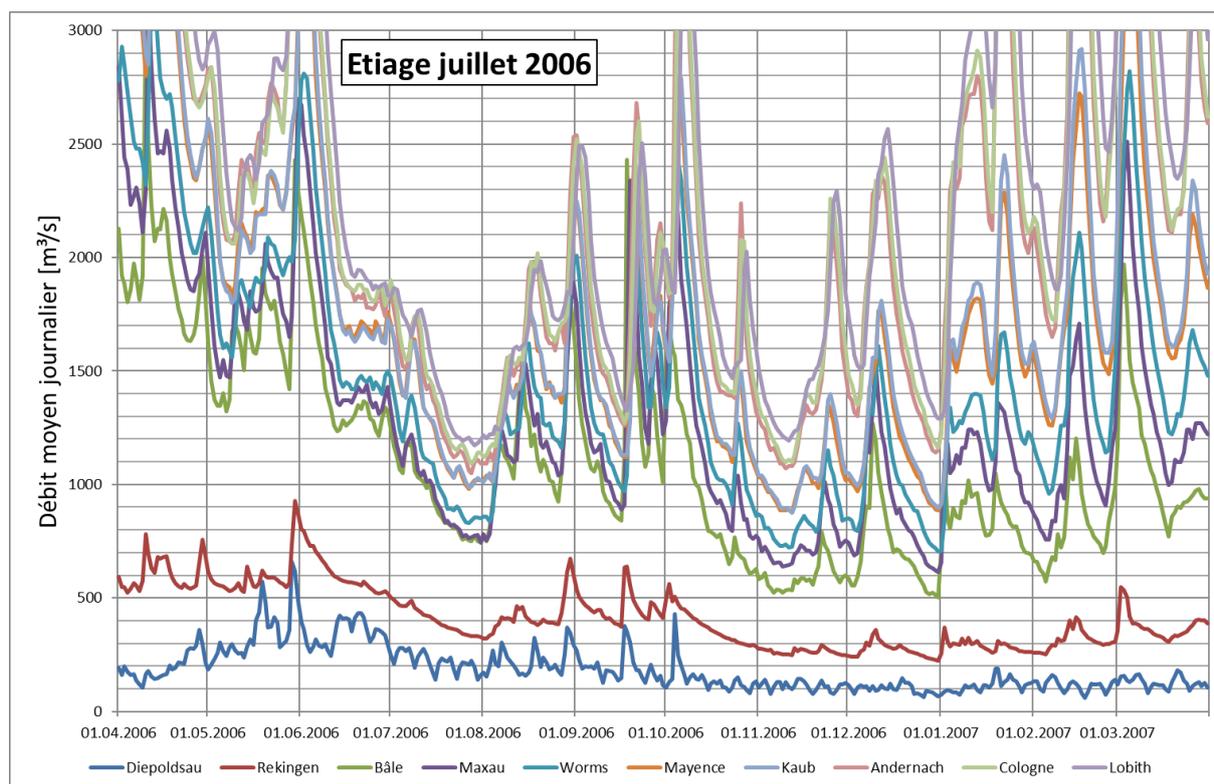
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Juillet- août 2006	Période de retour Juillet-août 2006	MaxD < NM7Q2 1961-2010	MaxD < MNM7Q Juillet-août 2006	Période de retour Juillet-août 2006
Diepoldsau	92,2	178	<2	4	0	-
Rekingen	238	329	<2	7	0	-
Bâle	527	756	<2	5	0	-
Maxau	645	766	<2	5	0	-
Worms	720	845	<2	5	0	-
Mayence	850	1008	<2	6	0	-
Kaub	851	1008	<2	6	0	-
Andernach	998	1084	<2	6	0	-
Cologne	1028	1120	<2	6	0	-
Lobith	1095	1190	<2	6	0	-

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : novembre/décembre 2011

## 1 Hydrogrammes :



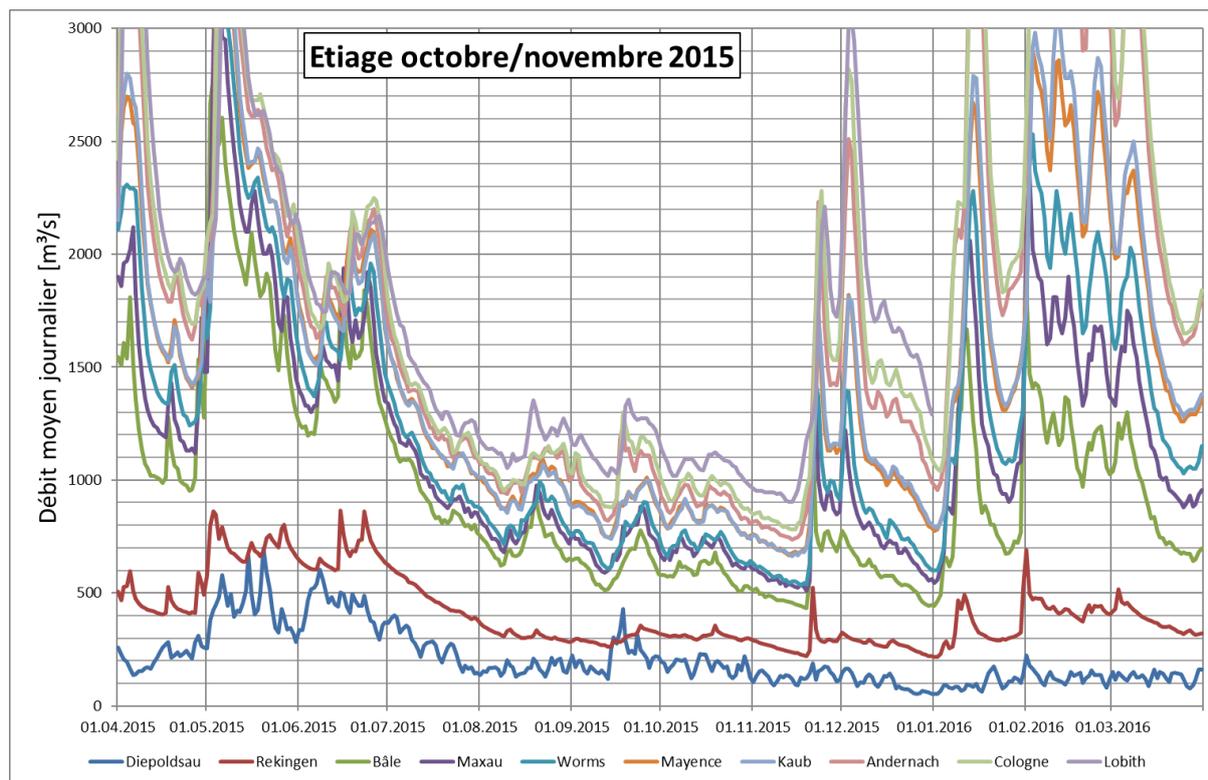
## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Nov./déc. 2011	Période de retour Nov./déc. 2011	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Nov./déc. 2011	Période de retour Nov./déc. 2011
Diepoldsau	92,2	92	2	4	2	<2
Rekingen	238	218	2	7	13	2-5
Bâle	527	447	5	5	23	5
Maxau	645	495	5-10	5	30	5-10
Worms	720	523	10	5	32	5-10
Mayence	850	647	10	6	30	5-10
Kaub	851	645	10	6	30	5-10
Andernach	998	721	10	6	32	5-10
Cologne	1028	751	10	6	33	5-10
Lobith	1095	848	10	6	33	5-10

MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

# Episode d'étiage : octobre/novembre 2015

## 1 Hydrogrammes :

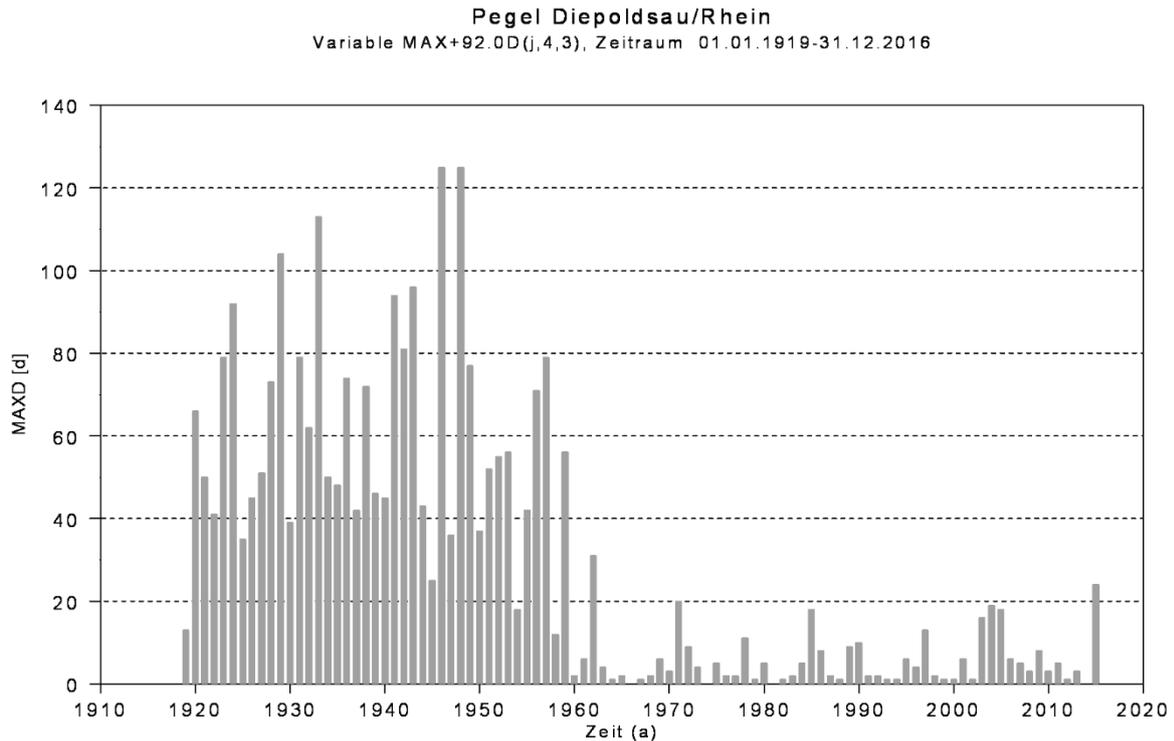


## 2 Paramètres :

	Débit d'étiage [m³/s]			Durée de l'étiage [jours]		
	MNM7Q 1961- 2010	NM7Q Oct./nov. 2015	Période de retour Oct./nov. 2015	MaxD < NM7Q2 1961- 2010	MaxD < MNM7Q Oct./nov. 2015	Période de retour Oct./nov. 2015
Diepoldsau	92,2	115	<2	4	1	<2
Rekingen	238	231	2	7	5	<2
Bâle	527	447	5	5	20	5-10
Maxau	645	528	5	5	27	5-10
Worms	720	545	10	5	29	5-10
Mayence	850	678	5-10	6	28	5-10
Kaub	851	675	5-10	6	28	5-10
Andernach	998	747	5-10	6	51	20
Cologne	1028	792	5-10	6	41	15
Lobith	1095	922	5-10	6	27	5

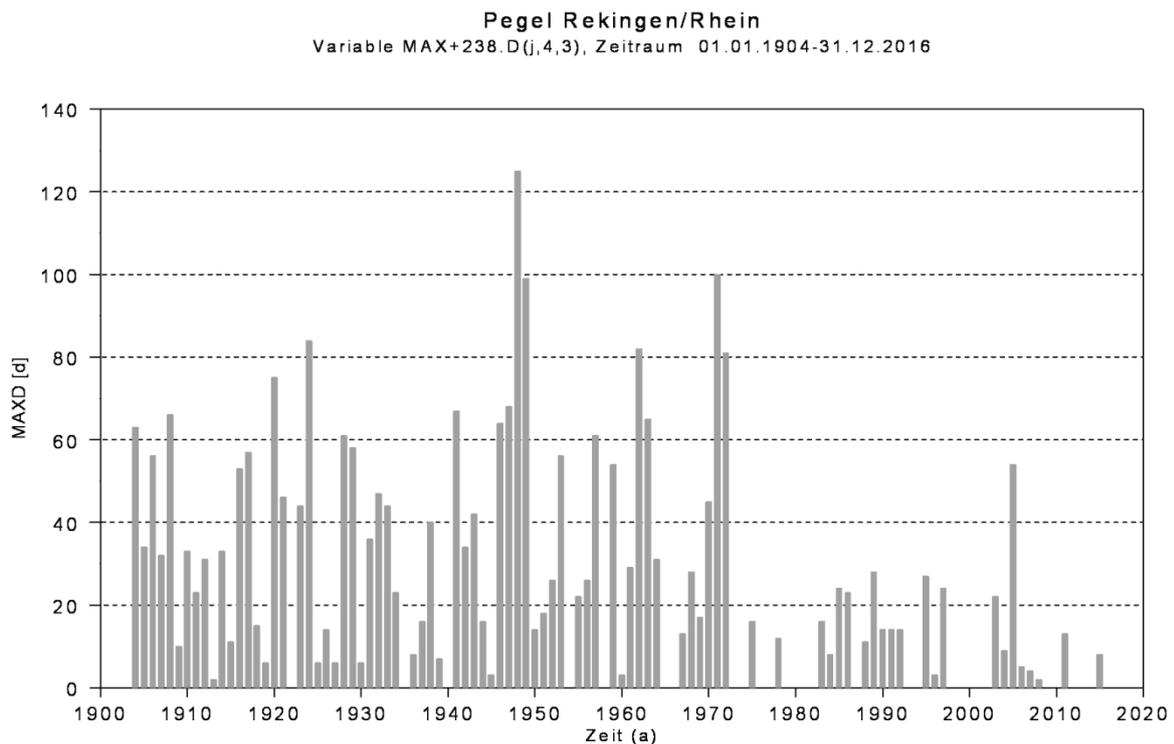
MaxD = durée maximale de jours consécutifs < MNM7Q  
 NM7Q2 = débit d'étiage NM7Q d'une période de retour de 2 ans  
 Les périodes de retour se réfèrent à la période de référence 1961 - 2010

### Annexe 3 : présentation des durées d'étiage (MaxD) (non traduite, voir légende au chapitre 7.4)



HyStat HQ/NQ 3.0

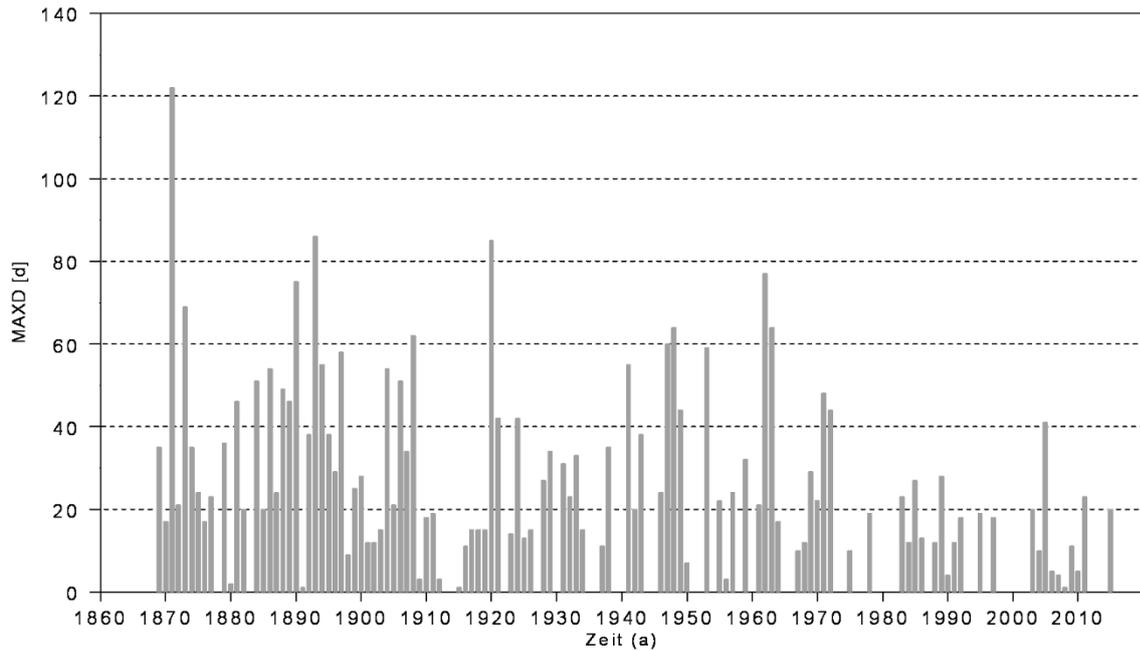
HLNUG 2017



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

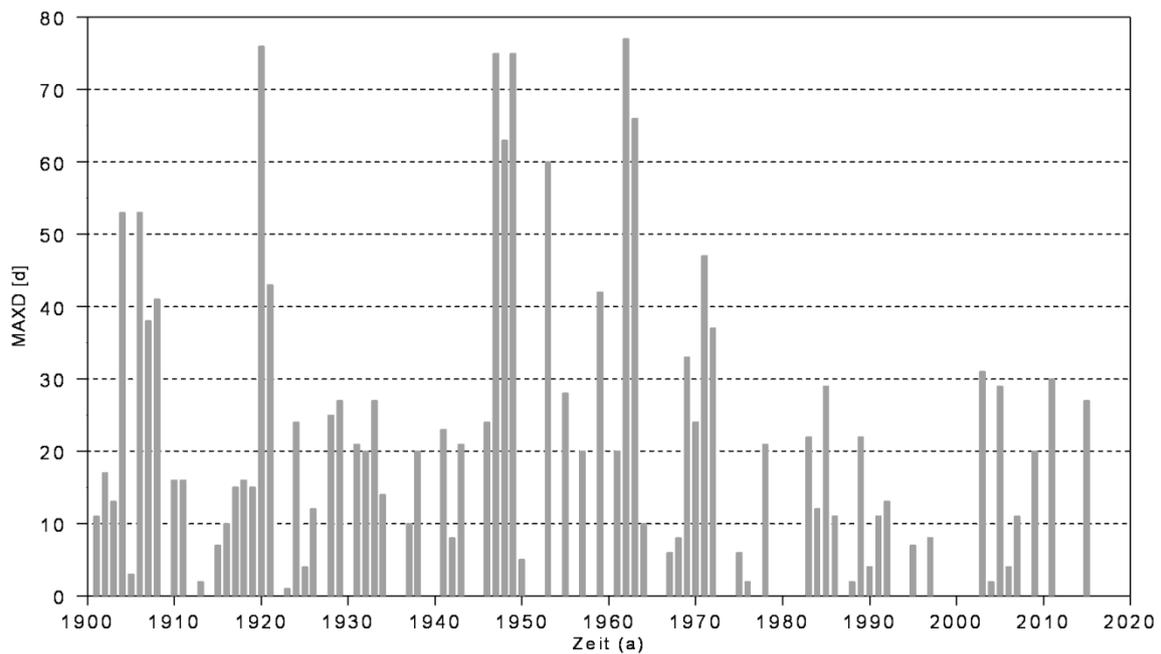
**Pegel Basel/Rhein**  
Variable MAX+527.D(j,4,3), Zeitraum 01.01.1869-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

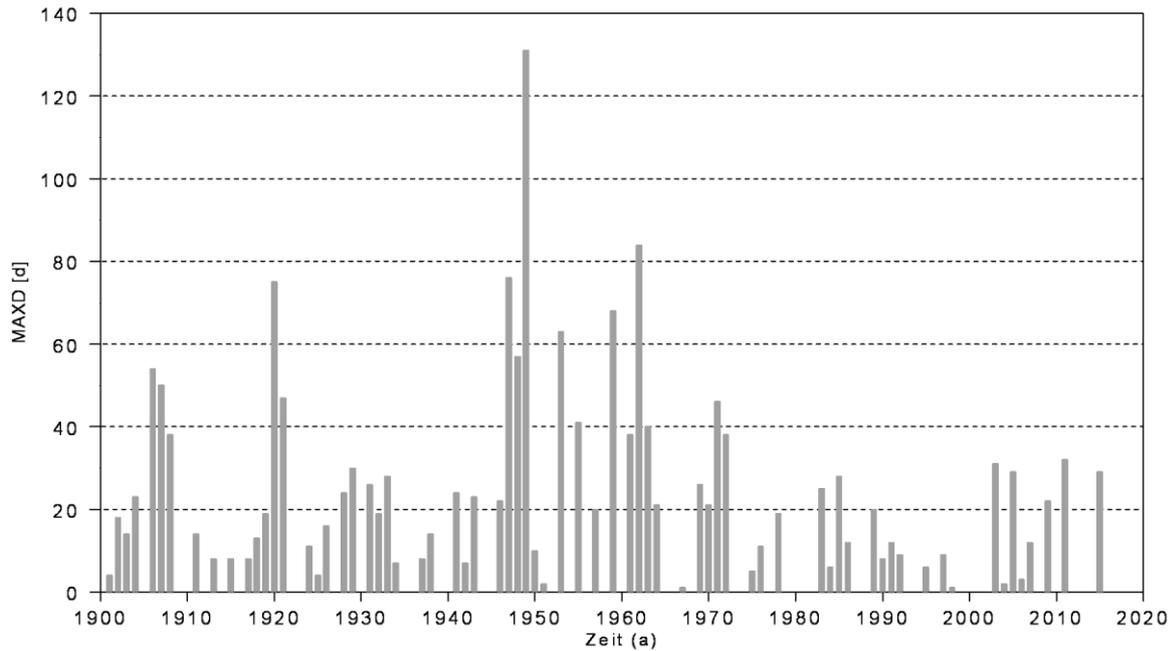
**Pegel Maxau/Rhein**  
Variable MAX+645.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

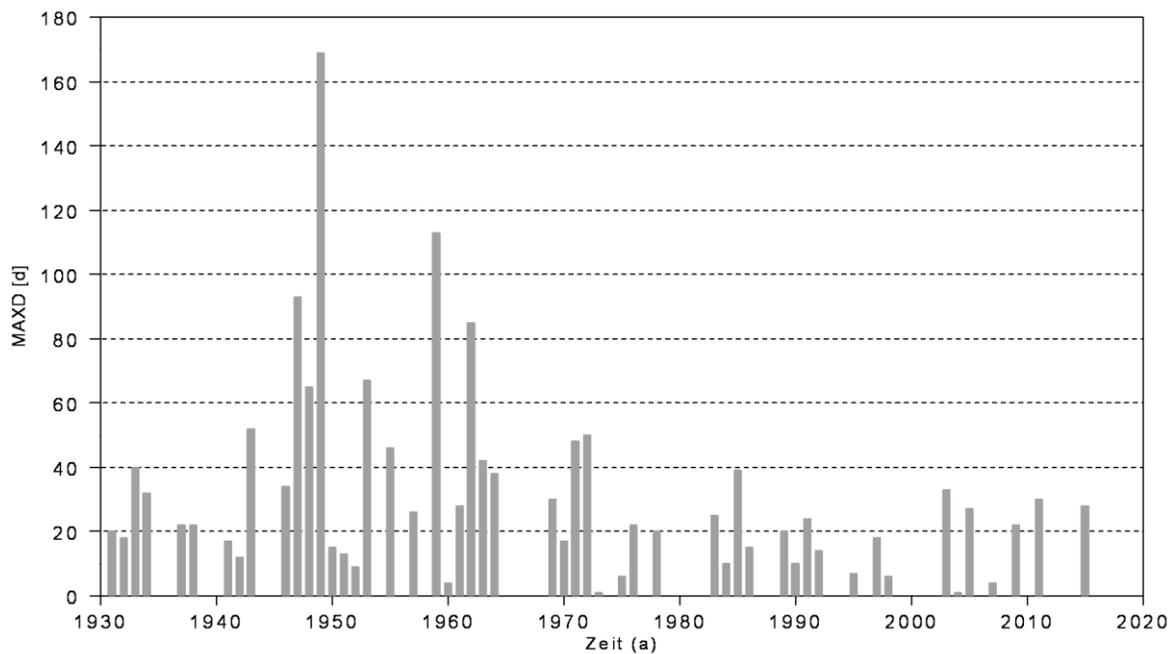
**Pegel Worms/Rhein**  
Variable MAX+720.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

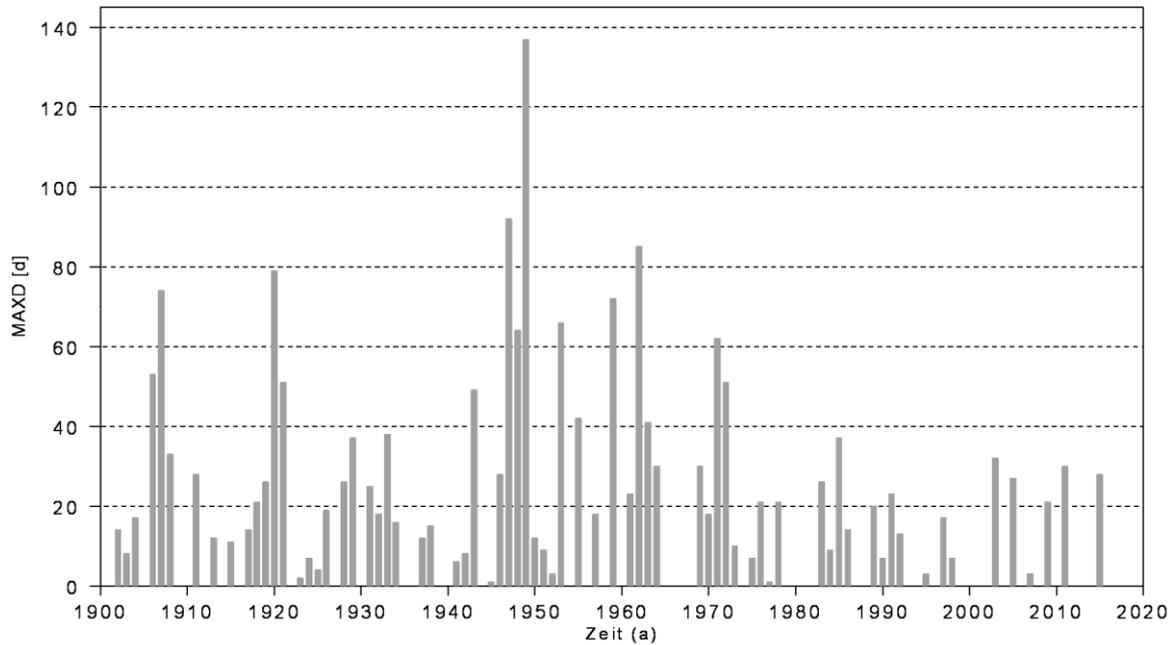
**Pegel Mainz/Rhein**  
Variable MAX+850.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1930-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

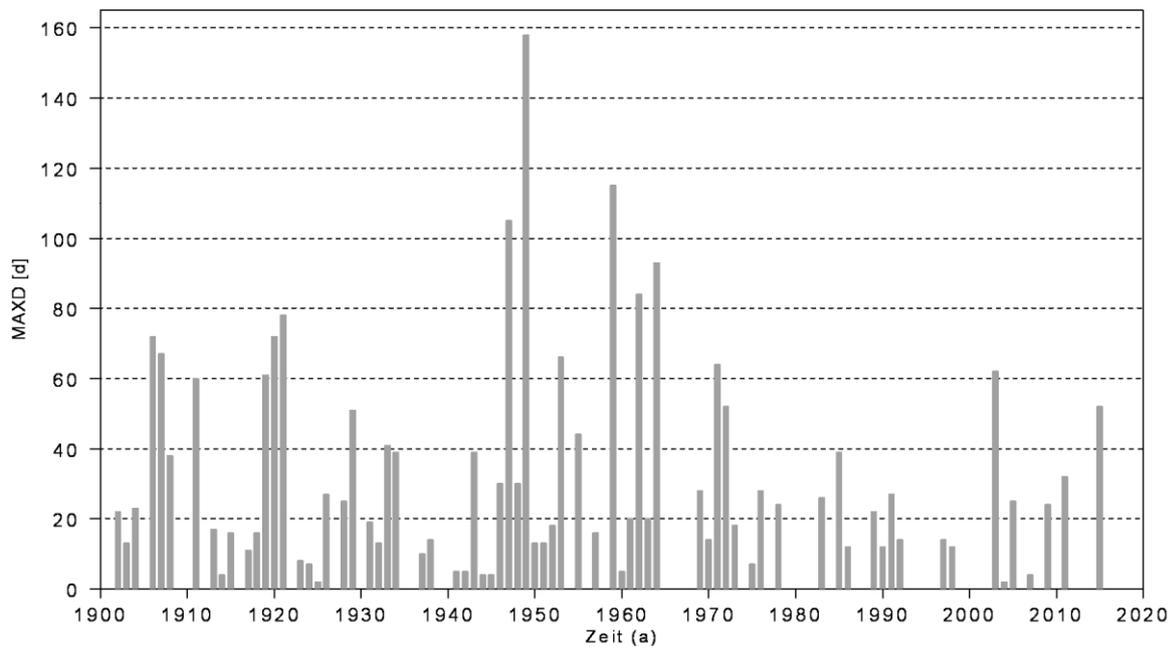
**Pegel Kaub/Rhein**  
Variable MAX+851.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



HyStat HQ/NQ 3.0

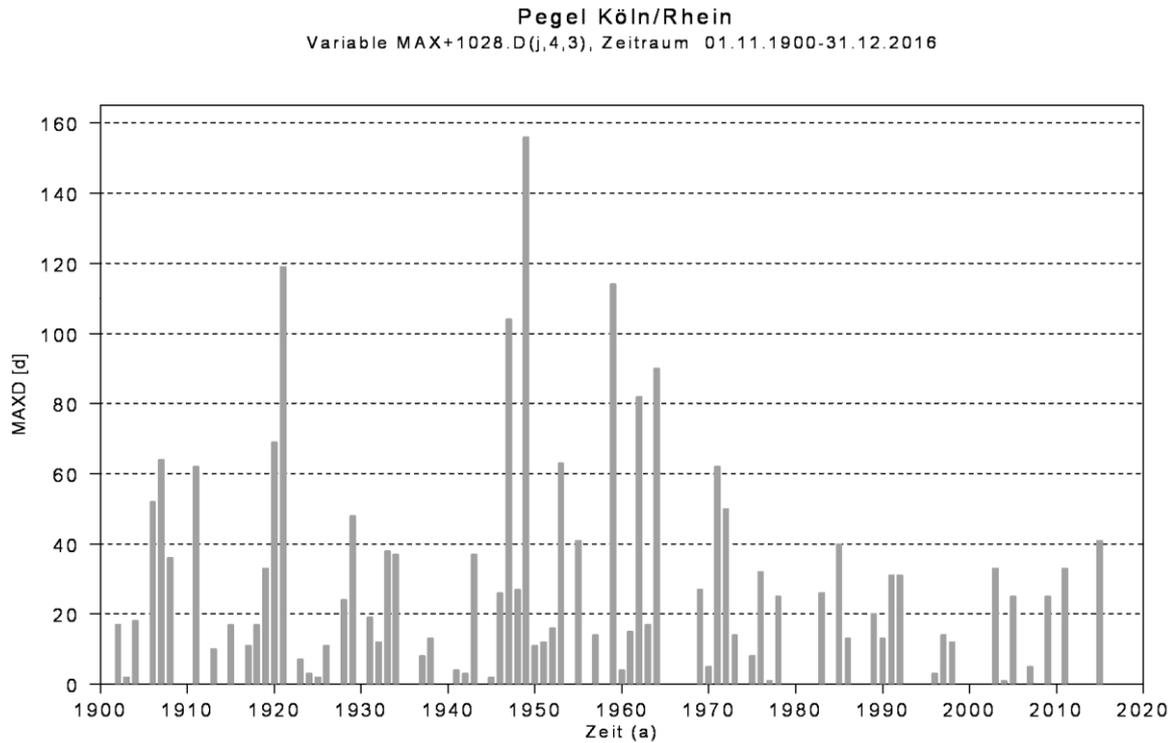
HLNUG 2017

**Pegel Andernach/Rhein**  
Variable MAX+998.D(j,4,3), Zeitraum 01.11.1900-31.12.2016



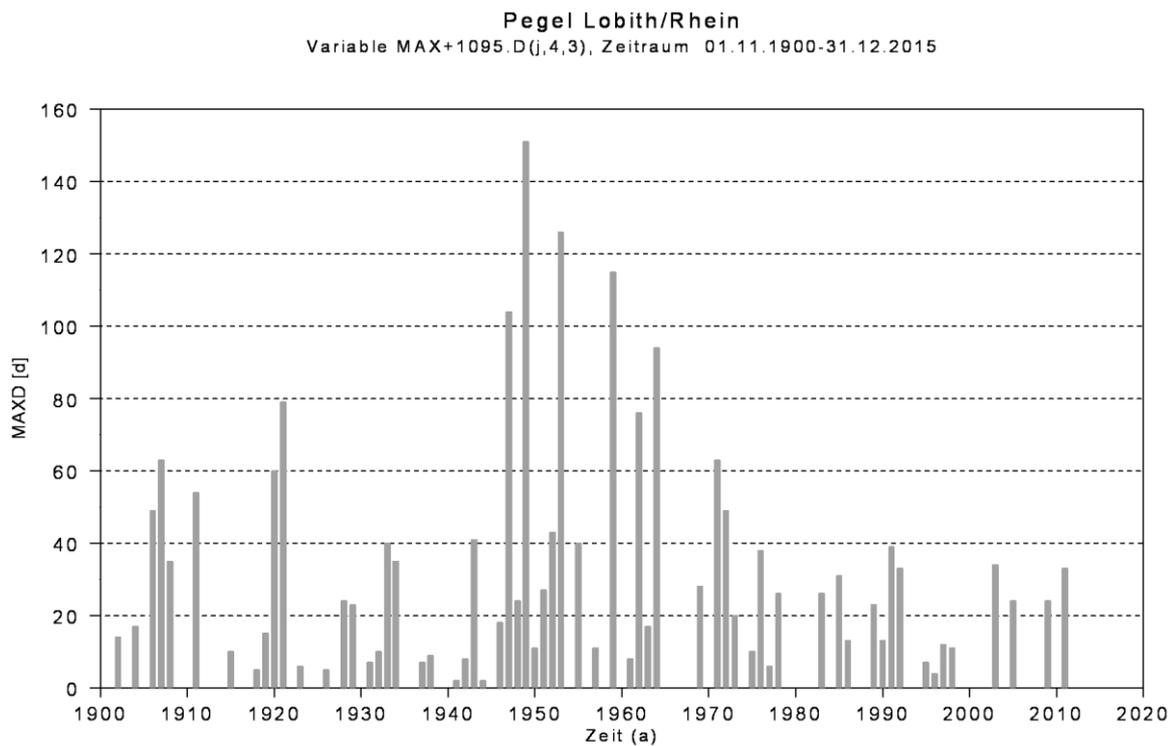
HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017



HyStat HQ/NQ 3.0

HLNUG 2017

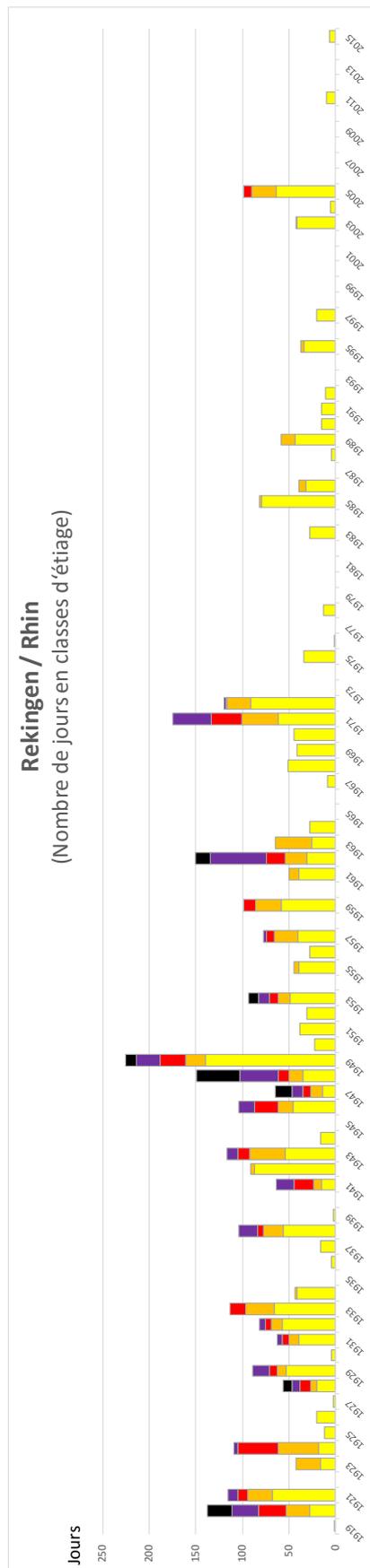
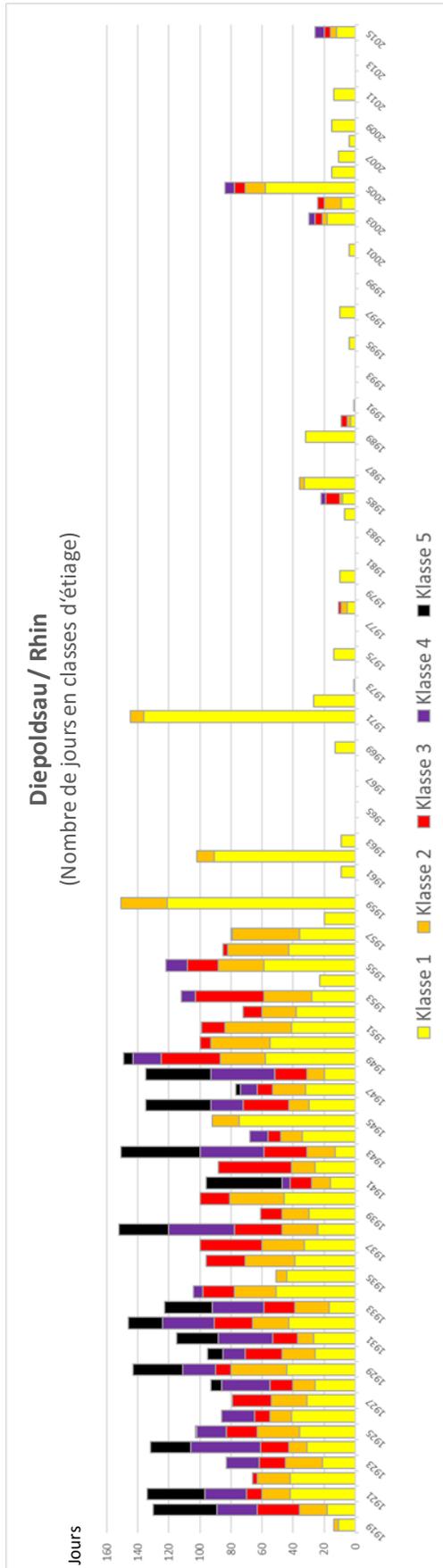


HyStat HQ/NQ 3.0

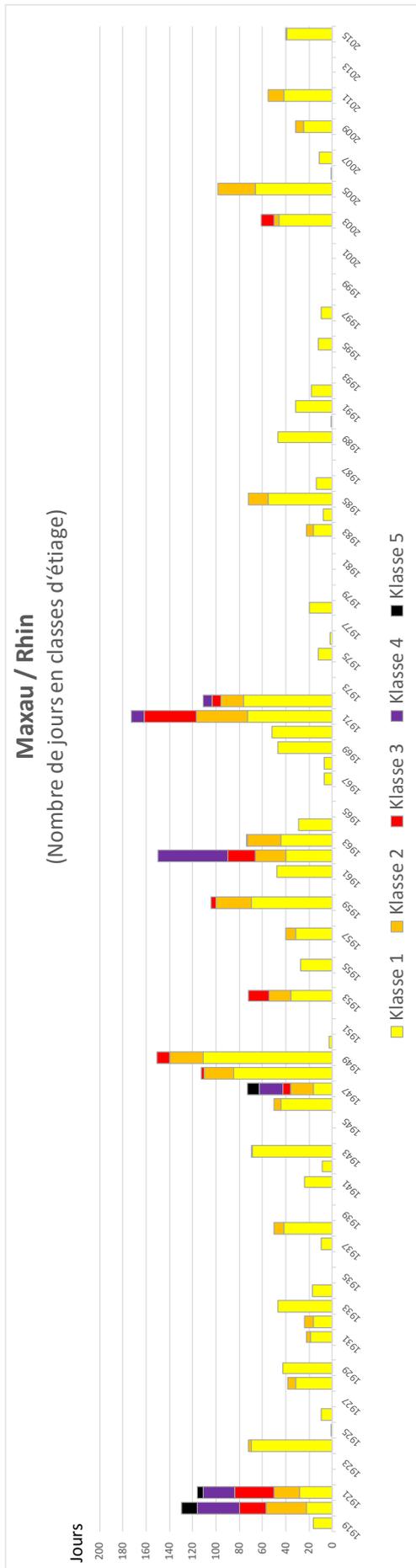
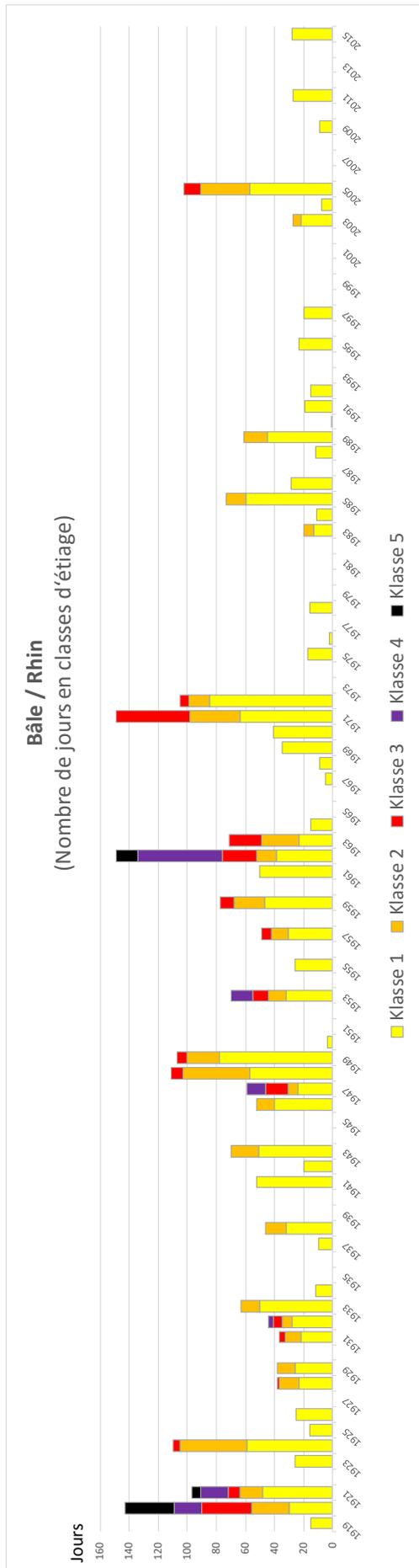
HLNUG 2017

## Annexe 4 : validation de la classification des étiages à l'aide des chroniques

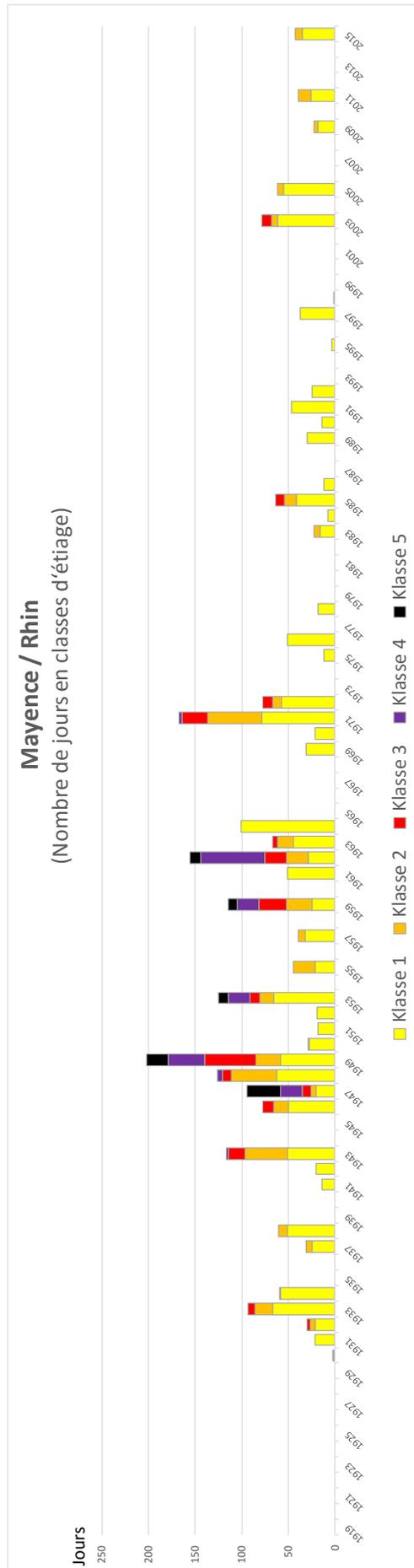
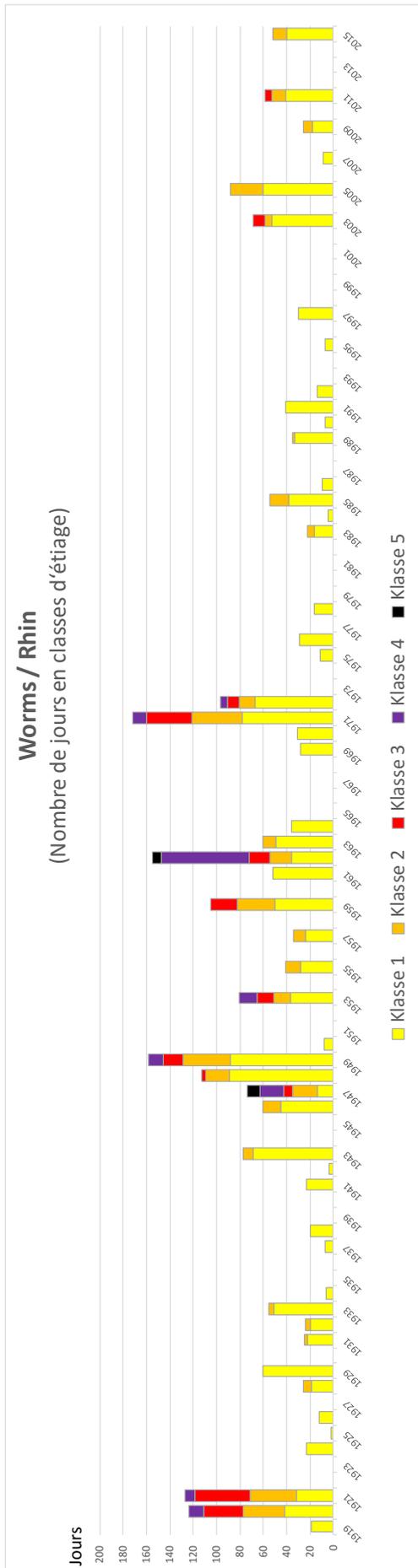
### Monitoring rétrospectif aux échelles de Diepoldsau et de Rekingen



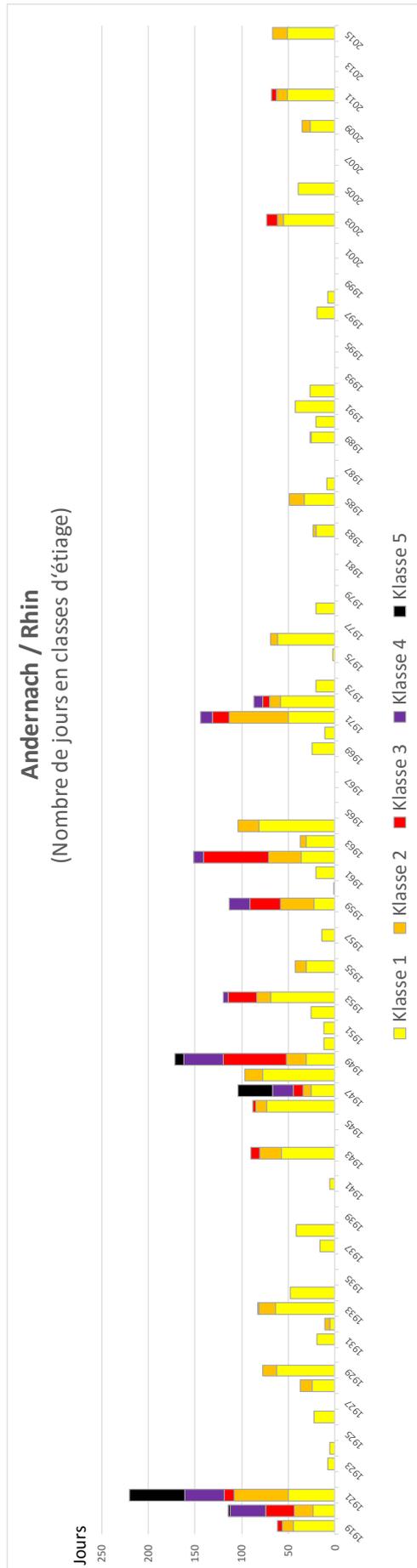
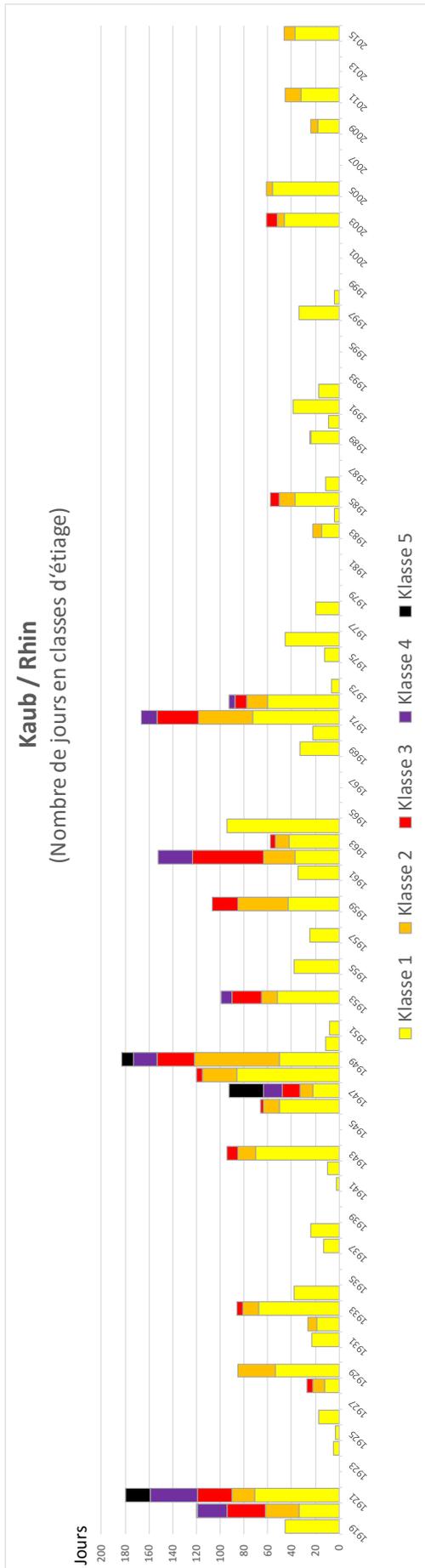
**Monitoring rétrospectif aux échelles de Bâle et de Maxau**



## Monitoring rétrospectif aux échelles de Worms et de Mayence



## Monitoring rétrospectif aux échelles de Kaub et d'Andernach



## Monitoring rétrospectif aux échelles de Cologne et de Lobith

